

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Návrh zhášecí tlumivky a automatického ladění
v síti OKD**

Proposal of Arc-suppression Coil in OKD network

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. David Kývala**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh zhášecí tlumivky a automatického ladění v síti OKD.**
Proposal of Arc-suppression Coil in OKD network.

Zásady pro vypracování:

1. Rozbor poruchových jevů v důlních kabelových sítích
2. Zemní spojení
3. Možnosti kompenzace poruchových proudů
4. Automatika ladění tlumivky
5. Optimální varianta řešení pro danou lokalitu
6. Technickoekonomické zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Hradílek, Z.: Elektroenergetika I a II. Skripta VŠB TU 1992 a 1993
2. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení. Skripta VŠB TU 1990
3. Pauza, J.: Zkrat v elektrických rozvodech, SNTL 1970
4. Dohnálek P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL Praha 1991
5. Hájek J., Kvasnica, P.: Přechodové jevy v el. soustavách, SNTL 1988 Praha
6. Normy ČSN, firemní literatura, technická dokumentace.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

**Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.**

V Havířově
5. května 2014

David Kývala



.....

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval všem, kteří přispěli ke vzniku této práce. Především zaměstnancům firmy DALKIA a váženému panu doc. Dr. Ing. Jiřímu Gureckému za pomoc a rady při vypracovávání předkládané diplomové práce.

Anotace

V předkládané diplomové práci se zabývám problematikou izolovaných sítí a zemních spojení, které se v těchto sítích mohou objevit a omezování zemních proudů pomocí zhášecí tlumivky. Práce je rozdělena na dvě hlavní části. V první, teoretické části, se věnuji popisu poruchových jevů v sítích, zemních spojení a jejich kompenzace a problematice automatického ladění zhášecích tlumivek. Následně pak v druhé, praktické části, určuji výpočtem parametry sítě a poté z vypočtených hodnot navrhuji zhášecí tlumivku, ke které v poslední části vybírám vhodnou automatiku ladění.

Klíčová slova – Petersenová tlumivka, ladění zhášecí tlumivky, kapacitní proud, zemní spojení

Abstract

The thesis deals with the issue of isolated networks and earth connection faults which may occur in these networks and as well as reducing earth current while applying arc suppression coil. The thesis is divided into two parts. The first theoretical part is focused on description of faults in networks, earth connections and their compensation, also on the issue of automatic arc suppression coil tuning. In the second practical part network parameters are calculated and based on these calculated figures a suppression coil and its appropriate automatic tuning are suggested.

Keywords – Petersen coil, arc suppression coil tuning, capacitive current, earth fault

Seznam použitých symbolů a zkratek

NN	Nízké napětí	[-]
VN	Vysoké napětí	[-]
VVN	Velmi vysoké napětí	[-]
DS	Distribuční soustava	[-]
PS	Přenosová soustava	[-]
ES	Elektrizační soustava	[-]
ZS	Zemní spojení	[-]
OZ	Systém opětného zapnutí	[-]
B	Susceptance	[S]
G	Konduktance (svod)	[S]
C_{01}, C_{02}, C_{03}	Kapacita proti zemi v místě nesymetrie	[F]
C_{12}, C_{23}, C_{13}	Kapacita mezi fázemi	[F]
$\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$	Fázory proudů systémového zdroje A, B, C	[A]
$\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$	Fázory proudů systémového zdroje 1, 2, 3	[A]
$\bar{I}_{12}, \bar{I}_{23}, \bar{I}_{31}$	Fázory kapacitních proudů tekoucí mezi fázemi	[A]
$\bar{I}_{C01}, \bar{I}_{C02}, \bar{I}_{C03}$	Fázory proudů v místě nesymetrie	[A]
\bar{I}_0	Fázor kapacitního proudu v místě nesymetrie	[A]
I_C	Efektivní hodnota vlastního kapacitního proudu vedení	[A]
\bar{I}_L	Fázor proudu tlumivkou	[A]
\bar{I}_L^*	Komplexně sdružený proud tekoucí tlumivkou	[A]
\bar{I}_p	Fázor poruchového proudu	[A]
I_{rest}	Zbytkový proud zemního spojení	[A]
k_0, k_{a0}	Kapacita proti zemi	[F]
L	Indukčnost tlumivky	[H]
Q	Jalový výkon	[var]
R_L	Odpor tlumivky	[Ω]
R_p	Odpor poruchy	[Ω]
U_f	Elektrické napětí fázové	[V]
U_0	Napětí uzlu vůči zemi	[V]
\bar{U}_0	Fázor napětí uzlu transformátoru	[V]
$\bar{U}_A, \bar{U}_B, \bar{U}_C$	Fázory sdružených napětí	[V]
$\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3; \bar{U}_{fa}, \bar{U}_{fb}, \bar{U}_{fc}$	Fázory fázových napětí	[V]
a	Operátor	[-]
α	Činitel útlumu	[Ω]
ε	Činitel nesymetrie	[Ω]
ω	Úhlová rychlost	[rad/s]
k	Nesymetrie	[-]
d	Útlum	[-]
v	Rozladění	[-]

Obsah:

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	- 5 -
OBSAH:.....	- 1 -
1 ÚVOD	- 2 -
2 ROZBOR PORUCHOVÝCH JEVŮ V DŮLNÍCH KABELOVÝCH SÍTÍCH.....	- 3 -
2.1 DŮLNÍ KABELOVÉ SÍTĚ	- 3 -
2.2 TEORETICKÝ ROZBOR ZKRATOVÝCH JEVŮ.....	- 3 -
2.3 ZKRATY.....	- 4 -
2.4 PŘÍČINY VZNIKU ZKRATU	- 4 -
2.5 NEBEZPEČNÉ DĚJE PŘI ZKRATU	- 4 -
2.6 DRUHY ZKRATŮ.....	- 5 -
2.7 PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU JEDNOTLIVÝCH DRUHŮ ZKRATŮ	- 7 -
2.8 ROZDĚLENÍ ES DLE ZPŮSOBU UZEMNĚNÍ	- 7 -
2.9 ZPŮSOB UZEMNĚNÍ DLE KRITÉRIÍ	- 8 -
2.10 SHRNUTÍ DŮLNÍ PROBLEMATIKY	- 9 -
3 ZEMNÍ SPOJENÍ.....	- 10 -
3.2 DĚLENÍ ZEMNÍCH SPOJENÍ	- 10 -
4 MOŽNOSTI KOMPENZACE PORUCHOVÝCH PROUDŮ.....	- 16 -
4.1 NEPŘÍMO UZEMNĚNÁ SÍŤ PŘES ZHÁŠECÍ TLUMIVKU.	- 16 -
4.2 SÍŤ S UZLEM UZEMNĚNÝM PŘES REZISTOR.....	- 18 -
4.3 SÍŤ S PŘECHODNÝM UZEMNĚNÍM UZLU	- 20 -
4.4 BAUCHŮV TRANSFORMÁTOR	- 22 -
4.5 VLIV KOMPENZACE NA FUNKCI ZEMNÍCH SMĚROVÝCH OCHRAN DŮLNÍCH SÍTÍ VN.	- 22 -
5 AUTOMATIKA LADĚNÍ TLUMIVKY	- 25 -
5.1 ZHÁŠECÍ TLUMIVKA A REZONANČNÍ KŘIVKA	- 25 -
5.2 LADĚNÍ ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK.....	- 27 -
6 PRAKTICKÁ ČÁST	- 34 -
6.1 VÝPOČTOVÁ ČÁST.....	- 34 -
6.2 VÝBĚR AUTOMATIKY LADĚNÍ ZHÁŠECÍ TLUMIVKY	- 53 -
7 ZÁVĚR:	- 62 -
POUŽITÁ LITERATURA	- 63 -
PŘÍLOHY	- 64 -

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je vhodný výběr automatiky ladění zhášecí tlumivky, která nahradí doposud používaný a nefunkční typ AL2 a AR3.

Na začátku mé práce se věnuji teoretickému rozboru poruchových jevů. Popisuji zde druhy a příčiny zkratů. Tyto jevy zmiňuji jak obecně, tak i z hlediska fungování důlních sítí. V hlubinných dolech se používá několik napěťových hladin. Jednak VN 22, 6 a 3,3kV, a pak NN napájení. V teoretické části se zabývám všemi druhy napěťových soustav, v praktickém návrhu zhášecí tlumivky už pouze povrchovou napájecí sítí 22kV. Další podkapitola obsahuje problematiku zemních spojení, jejich rozdělení a popis. V návaznosti potom v práci pojednávám o kompenzaci poruchových proudů a to pomocí zhášecí tlumivky, uzemněním přes rezistor, přechodným uzemněním uzlu a Bauchova transformátoru. Teoretickou část uzavírám popisem problematiky ladění zhášecí tlumivky. Základem automatiky ladění zhášecí tlumivky je nalezení rezonanční křivky. Veškerá teorie je pro názornost doplněna obrázky, grafy a základními vztahy.

Druhá část diplomové práce obsahuje praktické výpočty a nezbytnou teorii k popisu jednotlivých částí sítě. Zde je podstatný výpočet celkového kapacitního proudu, který je důležitý pro návrh zhášecí tlumivky. Po návrhu vhodné tlumivky, se zabírám výběrem automatiky ladění z nabídky na českém trhu.

2 Rozbor poruchových jevů v důlních kabelových sítích

2.1 Důlní kabelové sítě

Důlní kabelová síť je napájena z rozvodny na povrchu několika kabely (dle přenášeného výkonu) typu CNKODY (CMKODY), CYKCYDY. Povrchové rozvodny jsou postaveny jako dvousystémové s nainstalovaným hlídačem izolačního stavu důlní sítě a jsou dozorovány z místa se stálou obsluhou. Každá změna izolačního stavu je stálou obsluhou zaznamenána a zároveň je tato informace předána provozním zaměstnancům k posouzení resp. odstranění vzniklého stavu.

Přívodní kabely z povrchu jsou ukončeny v přívodních polích hlavní patrové rozvodny. Hlavní patrové rozvodny jsou umístěny v prostorech bez nebezpečí výbuchu metanu (BNM a BNP) a jsou nejčastěji konstruovány jako skříňové „IRODELOVÉ“. Jednotlivé odvodní skříně jsou většinou vybaveny moderními ochranami, které kromě nadproudu vyhodnocují i zemní spojení na vývodu, vedoucím do prostoru s nebezpečím výbuchu (SNM nebo SNP) s možností vypnutí při překročení nastavené meze.

V prostorech s nebezpečím výbuchu (SNM nebo SNP) je VN síť tvořena kabely s kovovým pancéřem, s kovovým stíněním, s kovovým stíněním žil nebo polovodivým stíněním.

Zemnicí soustava v dole je tvořena hlavním zemnicím vedením (tvořeným měděným stíněním kabelu nebo samostatným holým měděným lanem průřezu 50mm^2 , případně ocelovým pozinkovaným vodičem o průřezu minimálně 95mm^2) připojeným minimálně na dva strojené zemniče.

Ke spínání VN vedení ke strojům, rozváděčům a transformačním stanicím jsou používány VN vypínače ROK6, které jsou vybaveny nadproudovými ochranami (NPW, PNW) a zemními směrovými ochranami (ZSG, UPZ) s možností vypnutí poruchového stavu do 0,2s.

V porubech, kde jsou instalovány stroje s provozním napětím 3,3kV jsou pro napájení použity transformátory s převodem 6 / 3,3kV. K ovládání těchto strojů jsou použity kompaktní skříně se stykači VN, vybavenými veškerými jistíci prvky (nadproud, zemní ochrany, hlídání izolačního stavu před zapnutím ...) s možností vypnutí při překročení nastavených mezí. Kabely pohyblivých zařízení v těchto provozech jsou s kovovým nebo polovodivým stíněním žil a společným kovovým stíněním a vlečená část je uložena v ukladači.

Důležitým a spolehlivým prvkem zajišťujícím bezpečnost provozu VN zařízení je vypínání tohoto zařízení v závislosti na překročení dovolené koncentrace metanu ve větrném proudu. Umístění čidel, nastavená mez a rozsah vypnutí (stanovení ohrožené oblasti) je součástí provozní dokumentace provozních celků.

V současné době je důlní síť VN provozována jako síť izolovaná s rychlým a směrovým vypnutím vadného úseku (takto jsou provozovány tyto sítě i v okolních státech). V místech s největším nebezpečím jsou provozovány „lokální“ sítě 3,3kV, které jsou vybaveny nejmodernějšími bezpečnostními prvky. Celá důlní síť je instalována pouze v prostorech, které jsou trvale monitorovány metanovými čidly, která při překročení nastavené meze automaticky ohroženou oblast vypnou (mimo prostory bez nebezpečí výbuchu).

2.2 Teoretický rozbor zkratových jevů

Mezi nejčastější příčiny vzniku elektromagnetických přechodných jevů v elektrizační soustavě patří zkraty. Při zkratu prochází místem vzniku zkratu několikanásobně větší proud vzhledem k jmenovitým hodnotám. Způsobuje to výrazné snížení impedance zkratového obvodu. Obvod, který je mezi místem zkratu a napěťovými zdroji nazýváme zkratový obvod. Kdyby jednotlivé části elektrického obvodu měly nulový odpor, pak by zkratovým obvodem protékal dle Ohmova zákona nekonečně velký proud. V reálném zkratovém obvodu bývá vždy nějaký odpor, který je složen z vnitřních impedancí transformátorů, generátorů, z impedancí kabelů, vedení a z přechodových odporů jak na spojích, tak i v místě zkratu, takže zkratový proud dosáhne konečné velikosti.

Napětí v místě zkratu poklesne až na nepatrnou velikost, při dokonalém zkratu prakticky až na nulu. Celé vnitřní napětí zdroje se tedy spotřebuje na úbytky napětí v alternátorech, kabelových popř. venkovních vedeních a dalších prvcích sítě. [7]

2.3 Zkrat

Zkrat je elektromagnetický přechodový děj, který definujeme jako náhodné nebo úmyslné spojení dvou nebo více bodů obvodu (vodivé spojení fází, nebo jedné fáze se zemí), které mají během normálního provozu různá napětí, přes poměrně malý odpor nebo impedanci. Během zkratu obvodem protékají zkratové proudy, v blízkosti místa zkratu většinou několikanásobně převyšující běžné provozní proudy, následkem toho dochází k odpojení zkratovaných částí od zdroje. Přírozeným růstem spotřeby elektrické energie a s tím souvisejícím růstem elektrických výkonů v nových elektrárnách, spolu s dalším zvětšováním rozsahu elektrických sítí všech napětí, se zvyšují i zkratové proudy ve všech částech elektrického rozvodu, napětím VVN počínaje a napětím NN konče. Nárůst zkratových proudů v elektrizační soustavě je očividně nepříznivý jev.[8]

2.4 Příčiny vzniku zkratu

Různé vady zařízení, hlavně nedokonalá izolace - a to z výrobních důvodů (nevhodná technologie výroby, materiály atd.), nebo z důvodu špatné montáže (nedodržení technologie při montáži kabelových spojek a koncovek, nepředpisové pokládání kabelů atd.). K tomu se řadí rovněž poruchy z důvodu zhoršené kvality izolace dlouhodobým přetěžováním kabelových vedení - zrychlené stárnutí izolace způsobené zvýšenou teplotou při nadproudech.

Cizí zásahy (přírodní vlivy, lidé) - je to velmi častá příčina vzniku zkratu, např. přetržení či překopnutí kabelu při zemních pracích všeho druhu, dále působení hlodavců na plášť kabelu, sesuvy půdy, pády stromů do venkovního vedení. Do této kategorie lze zařadit i poškození plášťů kabelů vlivem bludných proudů.

Přepětí - atmosférické nebo i provozní má často za následek porušení izolace a následný zkrat.

Vlivem selhání lidského činitele - špatná manipulace v různých (obzvláště ve složitých) elektrických zařízeních, např. vypnutí přípojnicového odpojovače pod zatížením (bez vypnutí předřazeného vypínače) v rozvodech VN a VVN. Poté je to zanechání cizích předmětů (zvláště kovových) v zařízení po předchozí demontáži atd.

Nedostatečná zkratová odolnost zařízení – častý výskyt u starších, nerekonstruovaných zařízení v soustavách s velkým nárůstem hodnot zkratových proudů. Častým poškozováním zařízení při zkratu dochází pak následně k poruchám.[8]

2.5 Nebezpečné děje při zkratu

Mechanické působení - při zkratu dochází ke vzniku mechanické síly vlivem elektromagnetického působení zkratového proudu, který způsobuje ve formě dynamického rázu těžké mechanické namáhání veškerých částí elektrického systému (ohýbání pevných vodičů, kývání lanových vodičů, roztržení podpěrných izolátorů, přerušení vinutí elektrických strojů atd.).

Tepelné působení - působením zkratových proudů izolace kabelu stárne, dochází ke snižování mechanické pevnosti vodičů, narušení mechanické pevnosti různých spojů atd. Obzvláště nebezpečné je pak tepelné působení elektrického oblouku (těžké popáleniny osob, vznik požárů).

Pokles napětí - během zkratu dochází k náhlému poklesu impedance el. obvodu a k mimořádnému poklesu napětí, přičemž do místa poruchy tečou zkratové proudy ze všech zdrojů ES podle jejich el. vzdálenosti a výkonů. Úbytky napětí narůstají od místa zdrojů k místu zkratu, takže pokles napětí se různou měrou projeví v celé soustavě. Pokles napětí se nepříznivě projeví na funkci mnoha elektrických spotřebičů, např. u světelných spotřebičů dochází ke zmenšení světelného toku (žárovky), případně ke zhasnutí (zářivky, výbojky). Také u indukčních motorů, kde prudce klesá točivý moment motoru. Pokles napětí v přenosových soustavách také ohrožuje stabilitu chodu systému.

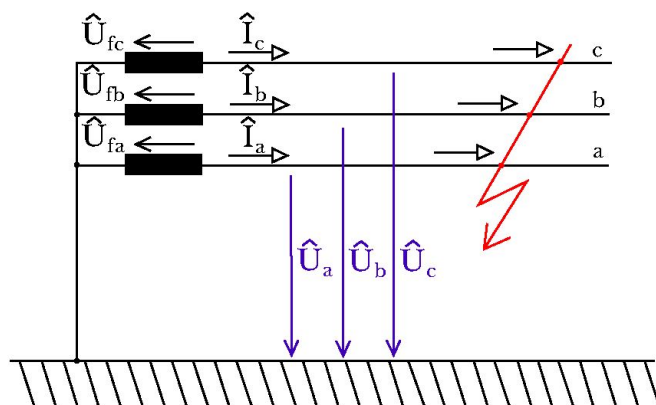
Přepětí - v souvislosti s vypínáním zkratových proudů v rozvodech vznikají přepětí dosahující hodnoty až dvojnásobku jmenovitého napětí. Zde je také nutno věnovat pozornost velikosti zotaveného napětí po odepnutí zkratu vypínačem. Zotavené napětí může svou strmostí narušit nejen izolaci el. zařízení, ale také vlastní vypínací proces ve vypínači opětným přeskokem vypínací dráhy a opětným zapálením oblouku mezi kontakty vypínače, což může vést i k havárii vypínače.

Indukované napětí - zkratové proudy, které tečou silovými vedeními (zemí) ohrožují funkčnost mnoha sdělovacích zařízení svým magnetickým polem, a zároveň i indukovaným napětím na těchto sdělovacích zařízeních.[8]

2.6 Druhy zkratů

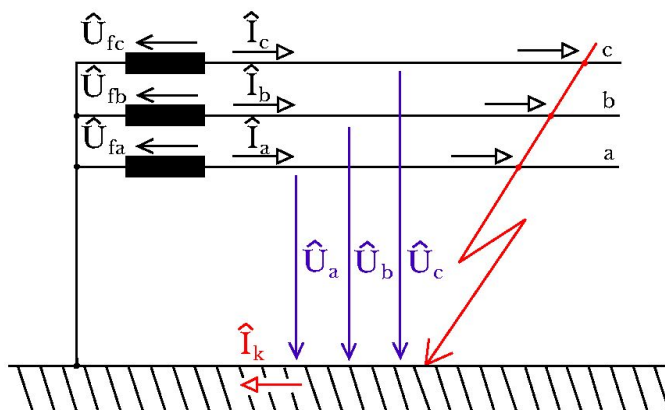
2.6.1 Souměrný zkrat

- *Trojpolový zkrat* nastává spojením všech tří fází elektrizační soustavy v jednom místě. Všechny tři vodiče jsou postiženy stejně a teče jimi stejný zkratový proud. Nejčastější výskyt tohoto druhu zkratu je v kabelových sítích (oblouk, vzniklý při jakémkoli zkratu lehce poruší izolaci mezi všemi fázemi) a často vede k nejvyšším hodnotám předpokládaného zkratového proudu. [7]



Obr. 1 - Trojpolový zkrat [7]

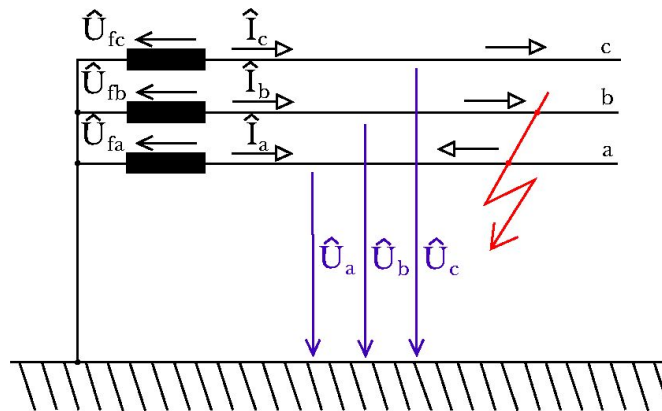
- *Trojfázový zemní zkrat* nastává spojením všech tří fází navzájem a jejich současným spojením se zemí. [7]



Obr. 2 - Trojfázový zemní zkrat [7]

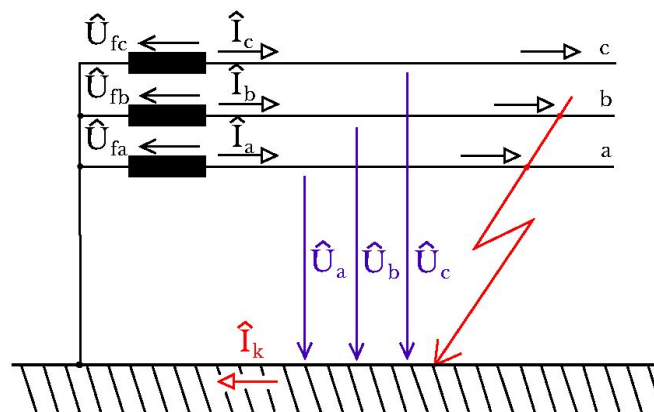
2.6.2 Nesouměrný zkrat

- *Dvojpolový zkrat* vzniká spojením dvou rozdílných fází v sítích s izolovaným uzlem zdroje (IT), nebo v uzemněných sítích (TN;TT) spojením dvou fází bez kontaktu se zemí (obr. 3). [7]



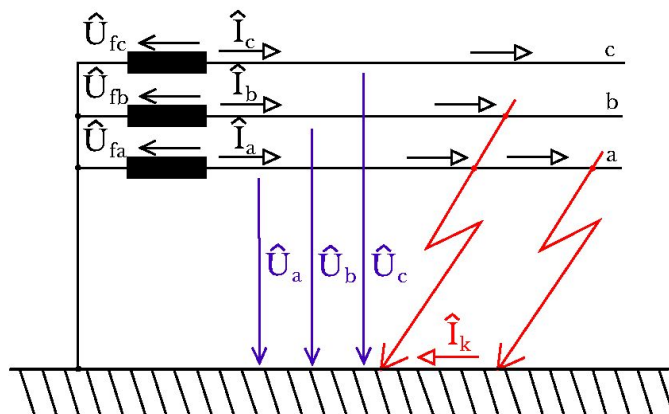
Obr. 3 - Dvoufázový zkrat [7]

- *Dvojpolový zemní zkrat* vzniká spojením dvou fází a země v sítích s uzemněným uzlem zdroje (TN;TT) (obr. 4). [7]



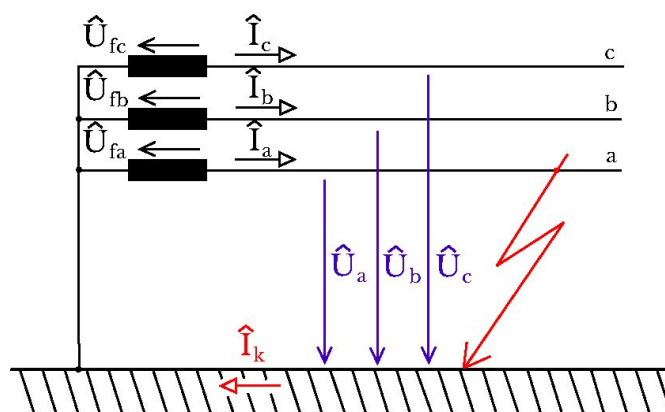
Obr. 4 - Dvoufázový zemní zkrat [7]

- *Simultánní zkrat* je zvláštní případ dvoufázového zemního zkratu, kdy dojde ke spojení dvou různých fází trojfázové soustavy se zemí na dvou různých místech. [7]



Obr. 5 - simultánní zkrat [7]

- *Jednofázový zkrat* vzniká spojením jedné fáze se zemí v sítích s uzemněným uzlem zdroje (TN; TT). Způsobuje největší rušení sdělovacích vedení (obr. 6). V sítích s izolovaným uzlem zdroje (IT) se tato porucha nazývá zemní spojení. [7]



Obr. 6 - jednofázový zemní zkrat [7]

2.7 Pravděpodobnost výskytu jednotlivých druhů zkratů

Při zkratové poruše dochází zpravidla k poškození jedné nebo dvou fází, jedná se tedy o zkrat nesouměrné. V tomto případě se neúčastní všechny fáze stejnou měrou na výsledné hodnotě zkratového proudu. Trojfázový zkrat se na vedení většinou nevyskytuje, ale vzhledem k velikosti zkratového proudu, který je při tomto zkratu často nejvyšší, je nutné se tímto typem zkratu také zabývat, zvláště při dimenzování zařízení. Na rozdíl od venkovních vedení se u kabelových vedení trojfázový zkrat vyskytuje poměrně často, vzhledem k tomu, že oblouk vzniklý při zkratu většinou poškodí postupně všechny tři fáze. Procentuální pravděpodobnost výskytu jednotlivých druhů zkratů na vedení je uvedena v Tab. 1 [8].

Tab. 1 – Pravděpodobnost výskytu jednotlivých druhů zkratů v [%] [8]

	22kV	110kV	220kV	kabelové sítě
jednofázové	65	91	93,1	–
dvojfázové	10	4,8	0,6	–
dvojfázové zemní	20	3,8	5,4	–
trojfázové	5	0,4	0,9	téměř 100

2.8 Rozdělení ES dle způsobu uzemnění

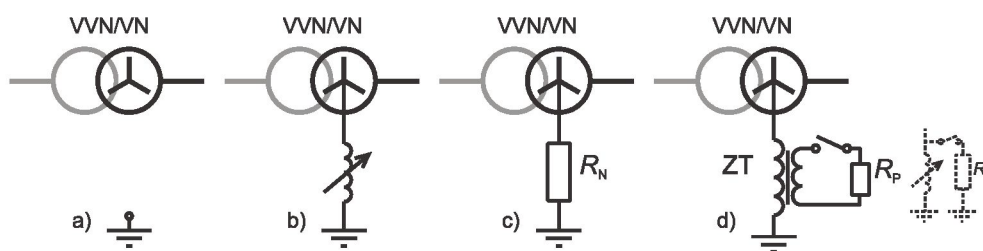
Vysokonapěťové soustavy v ČR je možné vzhledem k charakteru provozu rozdělit na soustavy distribuční s napětovými hladinami 10, 22 a 35kV a dále pak na soustavy elektrárenských, důlních a průmyslových provozů s napětovou hladinou většinou 6 a 10kV. Základní parametry a možnosti provozu distribučních soustav VN jsou dány zejména způsobem uzemnění transformátoru VVN/VN, tedy systémem spojení nulového bodu VN vinutí napájecího transformátoru se zemnicí soustavou. Způsob uzemnění nám určuje možnosti provozu soustavy z hlediska bezpečnosti, dimenzování, chránění, či nepřetržitosti dodávky elektrické energie. Pokud je symetrická síť v bezporuchovém stavu, pak se způsob uzemnění prakticky nijak neprojeví na jejím provozu. Zásadní rozdíl je v případě poruchy, kdy nastane vodivé spojení jedné fáze se zemí. V případě, že porucha vznikne uvnitř sítě účinně uzemněné či uzemněné přes uzlový odpor, jedná se o jednofázový zkrat a poruchový proud je na takové úrovni, která vylučuje další provoz postižené soustavy. V takovém případě musí dojít k odpojení postiženého vedení v co nejkratším čase a tedy i k přerušení dodávky elektrické energie. V sítích neúčinně uzemněných či izolovaných se jedná o zemní spojení, jehož poruchový proud nedosahuje tak vysoké úrovně a není tedy bezpodmínečně nutné okamžité vypnutí postiženého

vývodu. Právě úroveň poruchového proudu je do značné míry ovlivněna použitým druhem uzemnění a je tedy určující pro posouzení rizika úrazu elektrickým proudem, dimenzování či pro zhodnocení mechanických následků způsobených poruchou. Vzhledem k velké rozloze a členitosti jsou distribuční soustavy VN, které hustě pokrývají převážnou část našeho území, vystaveny mnoha nepříznivým vlivům. Tyto vlivy, jako například atmosférické podmínky, mohou způsobit v případě venkovního vedení značné množství přechodných zemních spojení, která sama v krátkém čase odezní bez nutnosti přerušení dodávky elektrické energie. Z tohoto důvodu jsou naše distribuční soustavy vysokého napětí přednostně provozovány jako neúčinně uzemněné. V současné době jsou zmíněné VN soustavy provozovány s ohledem na druh uzemnění jako soustavy:

- izolované (Obr. 7a),
- nepřímě uzemněné přes uzlový odpor (Obr. 7c) a
- nepřímě uzemněné přes zhášecí tlumivku (kompenzované soustavy) (Obr. 7b).

Přičemž pro poslední zmíněný typ soustavy se v ČR využívá několika modifikací, a to:

- klasická laděná zhášecí tlumivka s případným připínáním pomocného odporu pro navýšení činné složky poruchového proudu na sekundární straně, příležitostně na straně primární - „maďarský“ odpor (Obr. 7d),
- zhášecí tlumivka vybavená automatikou pro přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně,
- systém SwedishNeutral,
- 3-fázovou kompenzací zemních proudů.[8]



Obr. 7 – Příklad systémů uzemnění používaných v distribučních soustavách VN. [8]

2.9 Způsob uzemnění dle kritérií

Všechny varianty uzemnění uzlu transformátoru mají svá specifika a jsou vhodná pro určitý provoz DS či LDS (lokálních distribučních soustav) jako je elektrárenský, popř. průmyslový provoz. Valná většina distribučních soustav je na území ČR provozována jako kompenzovaná s nejobvyklejší variantou připínání odporu na sekundární straně zhášecí tlumivky. U elektrárenských a průmyslových provozů lze nalézt různé druhy způsobu uzemnění, tak například blokové vlastní spotřeby jsou provozovány jako izolované, společné vlastní spotřeby jsou většinou nepřímě uzemněné přes indukčnost a v rozvodnách odsíření elektrárenských provozů je pak běžný systém uzemnění soustavy přes odporník. *Důlní síť* jsou povětšinou provozovány jako izolované, ale s ohledem na novou legislativu a podmínky provozu se postupně u důlních sítí přechází na soustavy kompenzované.

Rozhodnutí o vhodnosti použití druhu uzemnění soustavy pro daný vysokonapěťový provoz, je možné provést na základě zohlednění důležitých kritérií (faktorů).

Mezi nejdůležitější kritéria patří:

- celkový kapacitní proud soustavy,
- úroveň poruchového proudu (zbytkový proud či kapacitní proud zemního spojení),
- ustálená poruchová napětí (stacionární rezonanční přepětí),
- přepětí při vzniku jednopólové poruchy,
- přepětí při přerušení 1 pólové poruchy (vliv elektrického oblouku, rychlost zotavení VN systému),
- ferorezonanční přepětí, přenesená napětí,
- způsob likvidace poruchy,

- možnost dosažení maximální citlivosti ochran,
- ovlivnění pomocných obvodů,
- porovnávací investiční náklady,
- provozní náklady, a v neposlední řadě
- bezpečnost s ohledem na hodnoty dotykových a krokových napětí, apod. [8]

2.10 Shrnutí důlní problematiky

Veškeré sítě v hlubinných dolech jsou provozovány jako izolované - s izolovaným nebo nevyvedeným uzlem napájecího transformátoru. (Dle ČSN 33 2000-4-41 Elektrotechnické předpisy - Elektrická zařízení, část 4 - Bezpečnost je označena jako síť IT).

Nejčastěji jsou používány napěťové soustavy 6kV, 1kV, 500V a pro osvětlení a signalizaci 220V.

Izolační stav důlních elektrických sítí je sledován přístroji pro kontrolu izolačního stavu.

Napěťová soustava vysokého napětí je v hlubinných dolech nejrozsáhlejší. Je provozována jako izolovaná soustava a je společná pro povrch i důl. Protože jsou z této sítě (kromě důlních provozů) napájena i těžební zařízení, hlavní ventilátory, kompresory a ostatní povrchová zařízení, je báňskými předpisy předepsána jen signalizace izolačního stavu bez vypínání. Signalizace musí být zajištěna na místa se stálou obsluhou, signalizuje se snížení izolačního stavu pod hodnotu 500/1 V.

Elektrické sítě nízkého napětí s příkonem větším než 5kVA lze provozovat v dole jen za předpokladu, že jsou vybaveny hlídačem izolačního stavu, který v plynujících dolech zajistí vypnutí této sítě při poklesu izolačního odporu sítě pod 150/1V (odst. 2 § 231 a vyhlášky ČBÚ č. 22/1989 Sb.).

Kabelové sítě VN mají v hlubinných dolech značný rozsah a dosahují délky 50 i více kilometrů. Jejich kapacitní proudy jsou běžně v rozsahu 25 - 45A, v některých případech i 90 A. Při zemních spojeních v takto rozsáhlé síti je v místě poruchy uvolněna značná tepelná energie. Protože v soustavách VN nemůže být použito vypínání hlídačem izolačního stavu, je nutné k zajištění bezpečnosti volit správné konstrukční provedení kabelů a použití rychle působících zemních ochran. Zároveň je nutné provést u sítí VN i opatření k omezení kapacitních proudů. Kabelové sítě NN zpravidla nemají takový rozsah, jejich kapacitní proudy jsou 2 - 3A.

Za optimální kabelovou síť lze z hlediska bezpečnosti považovat takovou důlní síť, kde při poškození (proražení) kabelu v důsledku mechanického poškození nedojde k zapálení (výbuchu) zaplynovaného důlního ovzduší.

Za nejspolehlivější řešení lze předpokládat:

- volbu druhu provozované sítě
- vhodné konstrukční provedení kabelu
- použití rychlé a spolehlivé ochrany, zajišťující využití při zemním spojení

2.10.1 Důlní kabelová síť VN

Nejmenší poruchové proudy při zemních spojeních bude mít důlní kabelová síť s automatickou kompenzací kapacitních proudů. Proudů tekoucích do země v místě poškození kabelu při použití soustavy s uzemněným uzlem přes ochranný odpor jsou větší, než proudy kapacitní v kabelové síti bez kompenzace kapacitních proudů. I přes rychlejší vypnutí sítě při zemní poruše a lepším tlumení přechodových přepětí při vzniku a zániku zemní poruchy brání tato nevýhoda tomu, abychom doporučovali sítě s uzemněním uzlu přes odpor jako náhradu provozu sítí s izolovaným uzlem nebo jim dávali přednost před automatickou kompenzací zemních kapacitních proudů zhášecími tlumivkami.

2.10.2 Důlní kabelová síť NN

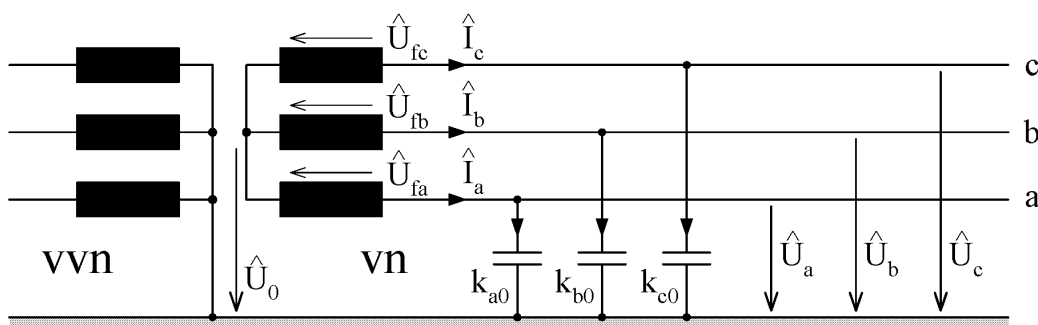
Jak již bylo uvedeno, s výjimkou kabelových sítí, jejichž napájecí transformátor má příkon menší než 5kVA, musí být použit přístroj pro kontrolu izolačního stavu, který zjišťuje zemní spojení. Také velikost kapacitních proudů je v důlních kabelových sítích NN v porovnání se sítěmi VN zanedbatelná. Nebezpečí destrukce kabelů při zemním spojení na povrch vnějšího pláště kabelu je proto podstatně menší.

3 Zemní spojení

3.1.1 Bezporuchový stav

Sítě s izolovaným uzlem bývají malého rozsahu a používají se tam, kde zemní proud nepřesáhne hodnotu 10A.

Základní schéma sítě před vznikem poruchy je na obr. 8. Pro studium zemních spojení uvažujeme jen kapacity sítě k zemi, pro zjednodušení ostatní parametry zanedbáváme (i svodové odpory jsou u zdravých fází 20krát až 50krát větší než kapacitní reaktance). Další předpoklad je, že napětí zdroje je symetrické a síť je v chodu naprázdno. [13]



Obr. 8 - Trojfázová soustava s izolovaným uzlem [13]

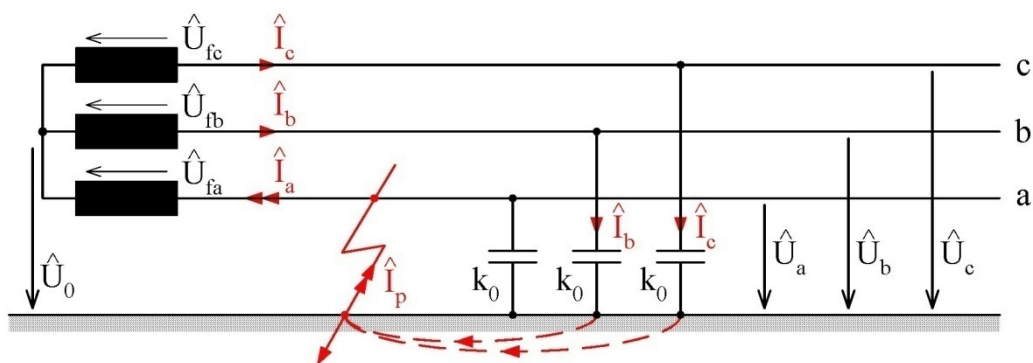
3.2 Dělení zemních spojení

Skutečné proudové a napěťové poměry v průběhu zemního spojení jsou značně závislé na druhu poruchy. Obecně lze zemní spojení popsat podle jeho doby trvání, velikosti přechodového odporu či jeho charakteru.

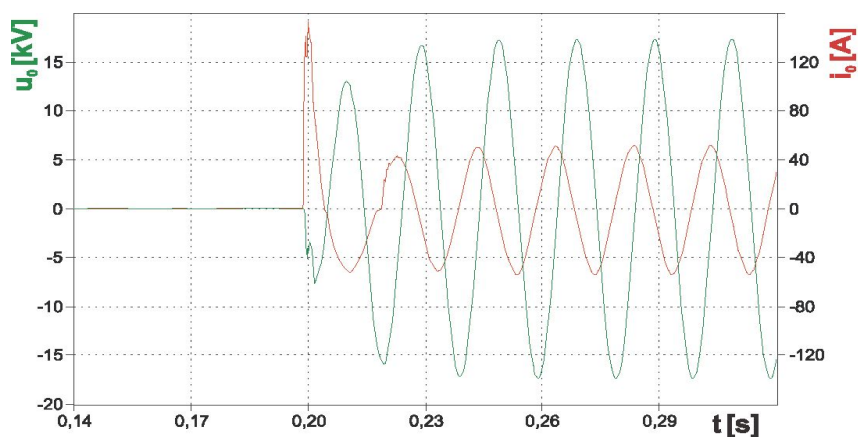
3.2.1 Vzhledem k velikosti odporu poruchy lze rozlišovat následující typy zemního spojení:

- kovová ($R_p = 0 \Omega$)
- oblouková ($R_p = \text{několik } \Omega$)
- odporová ($R_p = \text{několik set } \Omega$)

Kovové zemní spojení – při dokonalém (kovovém) trvalém zemním spojení bude schéma symetrické síť podle obr. 9. Při tomto typu poruchy je velikost přechodového odporu v řádech jednotek ohmů. V současnosti se však ukazuje, že míst, kde může v síti VN dojít ke vzniku kovového zemního spojení není mnoho. Pokud se blíže podíváme na technické podmínky provozu distribuční sítě VN zjistíme, že jediným opravdu reálným místem vzniku kovového zemního spojení nebo zemního spojení s velmi malým odporem jsou místa s vynikajícím uzemněním, tedy např. spínací stanice VN či distribuční trafostanice VN/NN, kde může dojít k přeskoku oblouku přímo na neživou část trafostanice vodivě spojenou s uzemněním. Příklad oscilografického průběhu netočivých složek napětí a proudů postiženého vývodu v případě opravdového kovového zemního spojení je zobrazen na Obr. 10. Výhodou kovových poruch je vysoká úroveň poruchového proudu a velmi nízké tlumení transienčních jevů při vzniku zemního spojení, vlivem čehož dosahují špičky kapacitního vybíjecího proudu úrovně, která umožňuje bezproblémové zaznamenání poruchy. [8]

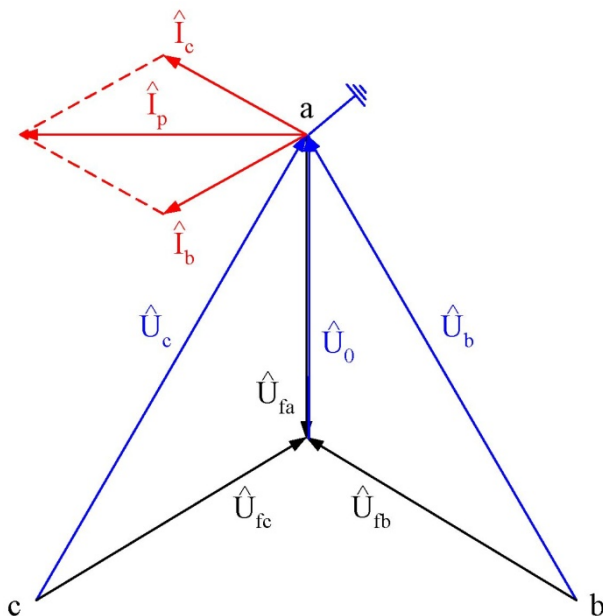


Obr. 9 - Zemní spojení v souměrné síti [13]

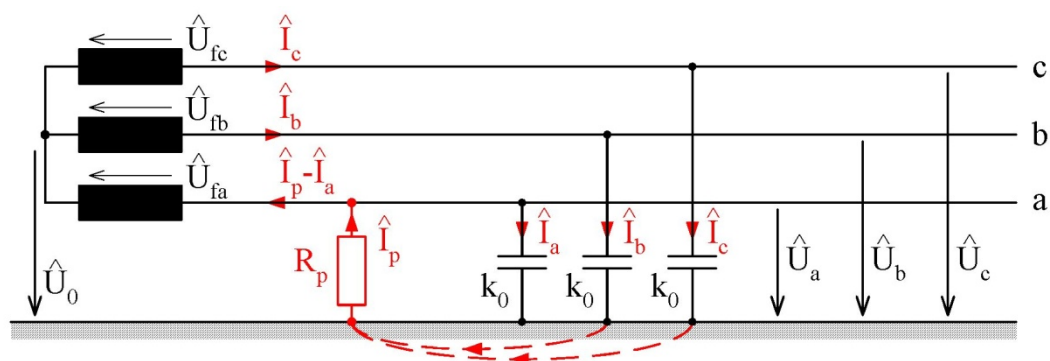


Obr. 10 - Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při kovovém ZS [8]

Napětové a proudové poměry při trvalém dokonalém zemním spojení jsou zřejmé z fázorového diagramu na obr. 11.

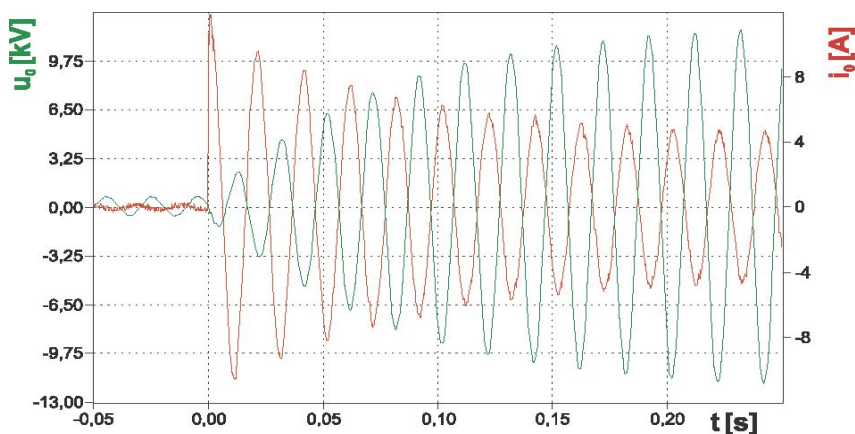


Obr. 11- Napětové a proudové poměry při zemním spojení [13]

Odporové zemní spojení

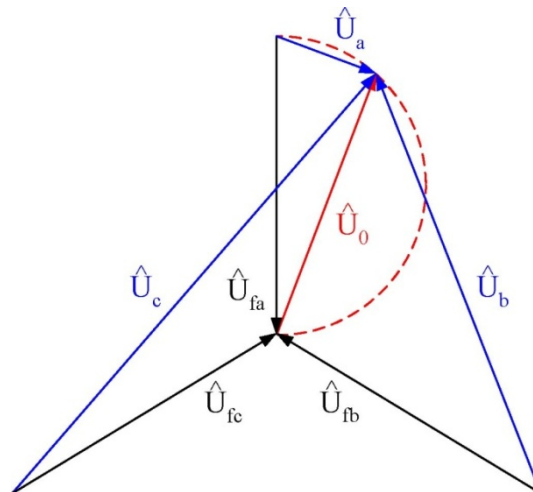
Obr. 12 - Odporové zemní spojení [13]

Při tomto spojení dosahuje přechodový odpor poruchy hodnot od několika stovek až po tisíce ohmů. Zemní spojení s hodnotou odporu poruchy přesahující $1\text{k}\Omega$ můžeme pak považovat za vysokoodporová ZS. Odporová zemní spojení jsou nejčastějším druhem poruchy ve venkovních distribučních sítích. Příklad oscilografického průběhu netočivého proudu a napětí během odporového zemního spojení je zobrazen na Obr. 13. Nevýhodou odporových zemních spojení je tlumení transienčních jevů (vybíjecího proudu) a snížení úrovně poruchového proudu spolu s netočivou složkou napětí, jak také plyne z porovnání Obr. 10 a Obr. 13. Tyto negativní vlivy velice komplikují indikaci poruchy a její následnou lokalizaci. Z toho lze tedy odvodit, že poruchy s odporem nad $1000\ \Omega$ jsou jen složitě lokalizovatelné. Poruchy s odporem v řádech až několika tisíc ohmů jsou pak jen obtížně zaznamenatelné, protože velmi nízká úroveň netočivé složky napětí při této poruše je velmi složitě odlišitelná od úrovně netočivé složky napětí v bezporuchovém stavu způsobené nesymetrií soustavy. Při vysokoodporové poruše nemusí dosáhnout netočivá složka napětí nastavené úrovně, díky čemuž následně nedojde k aktivaci automatik sloužící k detekci této poruchy. [8]

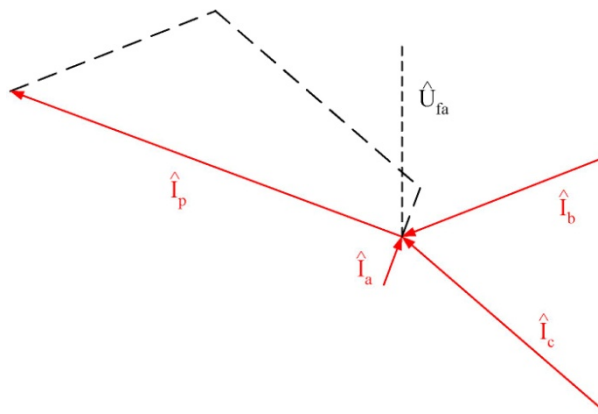
Obr. 13 - Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při odporovém ZS ($R_p = 1600\ \Omega$) [8]

Pro široký rozsah hodnot odporu R_p opisuje konec vektoru U_0 kružnici v Gaussově rovině.

Za těchto okolností může napětí jedné zdravé fáze dosáhnout i větší hodnoty než sduženého napětí sítě. Situaci názorně ukazují fázorové diagramy na obr. 14 a 15.

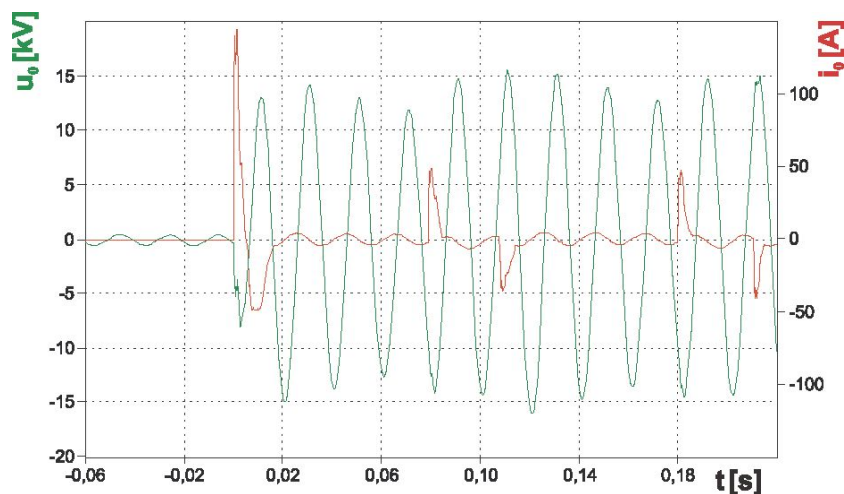


Obr. 14- Fázorový diagram napětí při odporovém zemním spojení [13]



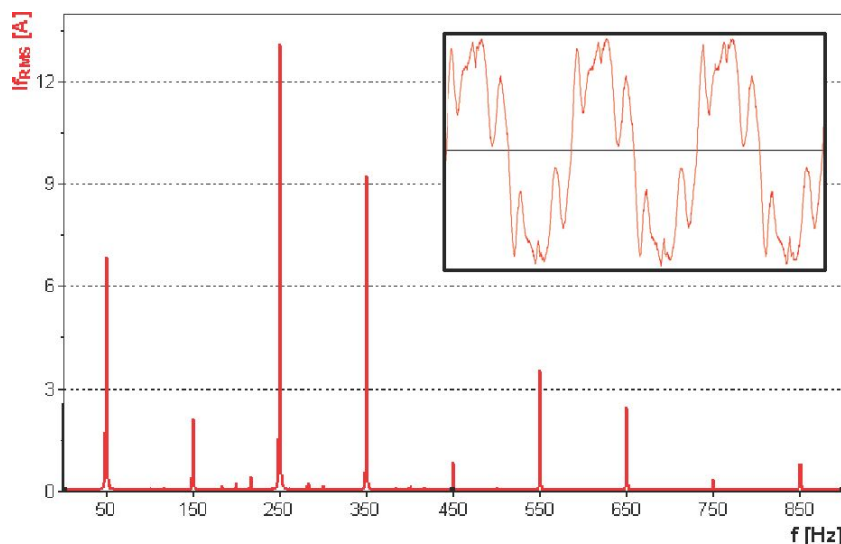
Obr. 15 - Fázorový diagram proudů při odporovém zemním spojení [13]

Obloukové zemní spojení - přechodový odpor v místě zemního spojení je vytvářen hlavně odporem oblouku. Obloukové poruchy jsou charakteristické zvláště krátkodobým přerušovaným hořením oblouku. Jeho následkem jsou krátkodobá přepětí a proudové vybíjecí špičky velkých úrovní během poruchy. Příklad zobrazení oscilografického průběhu netočivé složky proudu a napětí postiženého vývodu během obloukového zemního spojení na poškozeném kabelu je zobrazen na Obr. 16. [8]



Obr. 16 Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při obloukovém ZS [8]

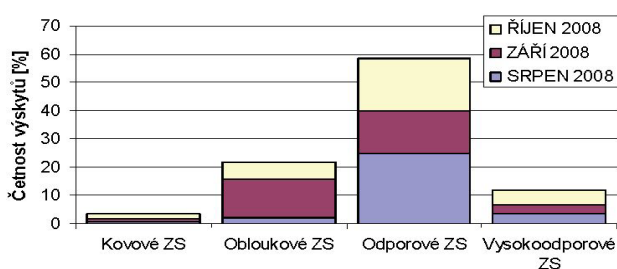
Dalším význačným rysem, který se v současné době značně projevuje, je obsah harmonických vyššího řádu v poruchovém proudu, a to zvláště v případě zemních spojení uvnitř městských či průmyslových distribučních sítí. Vzhledem k tomu, že nejsou tyto složky kompenzovány zhášecí tlumivkou (je naladěna do rezonance se základní harmonickou), dosahují často v poruchovém proudu vyšší úrovně než je reziduální proud základní harmonické. Na Obr. 17 je zobrazen příklad spektra efektivních hodnot jednotlivých frekvenčních složek obsažených v poruchovém proudu během zemního spojení uvnitř městské distribuční soustavy. [8]



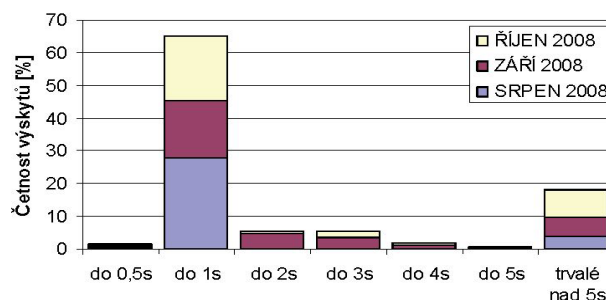
Obr. 17 - RMS amplitudové spektrum poruchového proudu v městské distribuční síti [8]

3.2.2 Dle doby trvání lze rozdělit poruchy na:

- Velmi krátká (mžiková) zemní spojení - doba trvání tohoto typu zemního spojení je do 5s,
- Krátkodobá zemní spojení - doba trvání je od 5 s do 10 minut,
- Trvalá zemní spojení - doba trvání nad 10 minut,
- Přerušovaná zemní spojení - jedná se o mžiková zemní spojení v krátkodobém sledu za sebou (přerušované hoření oblouku Obr. 17).



Obr. 18 - Čtvrtletní četnost výskytu zemního spojení kategorizovaná dle velikosti přechodového odporu



Obr. 19 - Čtvrtletní četnost výskytu zemního spojení kategorizovaná dle doby trvání poruchy

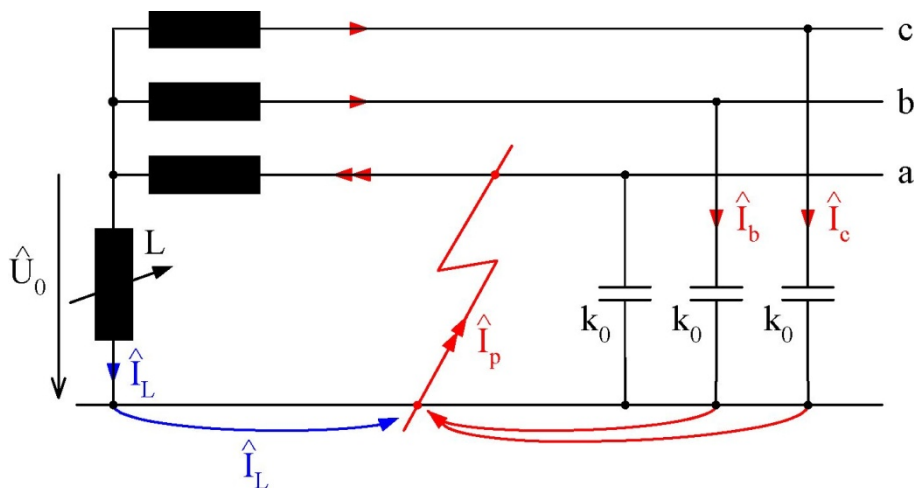
Na Obr. 18 a Obr. 19 je vidět četnost výskytů zemního spojení rozčleněna dle typu a doby trvání poruchy vyhodnocená za jedno čtvrtletí v reálné mimoměstské oblasti venkovní distribuční soustavy. Z těchto grafů je patrné, že nejčastějším druhem poruchy ve sledované oblasti je mžikové odporové zemní spojení s dobou trvání do 1s. Na Obr. 18 je za vysokoodporové zemní spojení považována porucha s přechodovým odporem nad $1\text{k}\Omega$. [8]

4 Možnosti kompenzace poruchových proudů

V sítích, kde zemní proud převyšuje hodnotu 10A, se doporučuje jeho kompenzace, při proudech nad 20A je kompenzace nutná.

4.1 Nepřímo uzemněná síť přes zhášecí tlumivku.

V rozvodnách VN se dnes používá několik způsobů nepřímého uzemnění, z nichž nejčastějším je plynule regulovatelná zhášecí tlumivka. Tato tlumivka se zapojuje mezi uzel transformátoru a zem. Princip její činnosti v síti je patrný z obr. 20. [13]



Obr. 20 - Činnost zhášecí tlumivky [13]

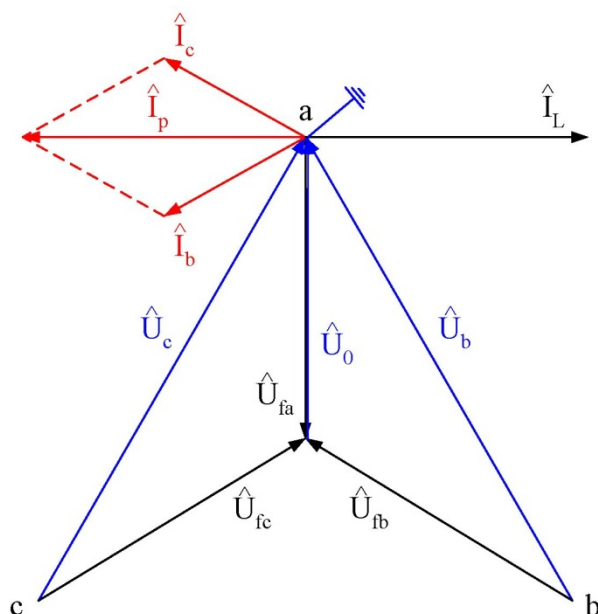
- Hlavní výhodou je snížení hodnoty poruchového kapacitního proudu v místě zemního spojení.
- Velikost zbytkového proudu závisí při dokonalém provedení kompenzace na kapacitě sítě, jenž je dána rozlohou, provozním napětí a svodem, jenž je charakterizován izolačním stavem sítě, tzn. stářím sítě a její údržbou.
- Zemní proud po vykompenzování kapacitního proudu obsahuje již jen proud způsobený svodem, činnou složkou proudu tlumivky, činnou složkou nabíjecího proudu a proudy harmonických. Při dokonalé kompenzaci je zbytkový proud čistě činný, při nedokonalé kompenzaci je ve zbytkovém proudu obsažen mimo uvedený činný proud ještě jalový, a to kapacitní nebo induktivní, podle toho, je-li síť podkompenzovaná nebo překompenzovaná.
- Činná složka zemního proudu se nedá kompenzací zmenšit, naopak indukčním kompenzačním proudem se ještě o něco zvětší. Kapacitní složku zemního proudu můžeme správným naladěním kompenzačního zařízení úplně odstranit.

V bezporuchovém chodu je při kapacitně souměrné síti napětí uzlu $U_0 = 0$, při obvyklých nesymetriích bývá $U_0 < 0,01 U_f$.

Při dokonalém zemním spojení je napětí uzlu $U_0 = -U_{fa}$. Proud tekoucí nyní ideální zhášecí tlumivkou cívku bude zpožděn o $\pi/2$ za napětím U_0 :

$$\bar{I}_L = -j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} \quad (1.)$$

Při vhodně předem nastavené velikosti indukčnosti L dojde ke kompenzaci zemních proudů. Indukční proud, který teče od tlumivky k místu zemního spojení je v protifázi s kapacitními proudy zdravých fází a dojde tak k uhašení oblouku – viz obr. 21.



Obr. 21 - Princip kompenzace zemního proudu [13]

Při úplné kompenzaci platí:

$$\bar{I}_L = -\bar{I}_p \quad (2.)$$

Následně

$$-j \frac{\bar{U}_0}{\omega L} = -3j\omega k_0 \bar{U}_0 \quad (3.)$$

Potřebná indukčnost ideální zhášecí cívky pro úplnou kompenzaci zemního proudu bude z předchozí rovnice:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 k_0} (H; s^{-1}, F) \quad (4.)$$

Zdánlivý výkon zhášecí tlumivky:

$$\bar{S}_L = \bar{U}_0 \bar{I}_L^* = \bar{U}_0 \frac{\bar{U}_0^*}{-j\omega L} = U_0^2 j3\omega k_0 = U_f^2 j3\omega k_0 = U^2 j\omega k_0 [VA; s^{-1}, F, V] \quad (5.)$$

kde U [V] je sdružené napětí sítě.

Tento výkon je jalový indukční:

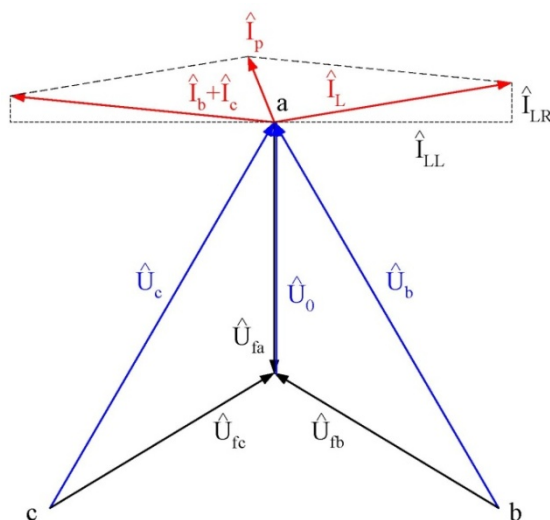
$$Q = \omega k_0 U^2 [VAR; s^{-1}, F, V] \quad (6.)$$

Při ideální kompenzaci neteče místem poruchy žádný proud, oblouk se tedy neudrží. Při reálných poměrech zůstává v místě poruchy zbytkový proud, který obsahuje jednak nevykompenzovaný proud nepřesného nastavení indukčnosti, nevykompenzovatelnou činnou složku způsobenou svody vedení a činným odporem zhášecí tlumivky a nakonec i proudy vyšších harmonických. Pokud je tento zbytkový proud menší než 5A, dojde rovněž k uhašení oblouku vlivem deionizace jeho dráhy.

Poruchový proud pak můžeme vyjádřit jako:

$$\bar{I}_p = \left[\frac{1}{R_L} + 3G_0 + j(3\omega k_0 - \frac{1}{\omega L}) \right] \bar{U}_0 \quad (7.)$$

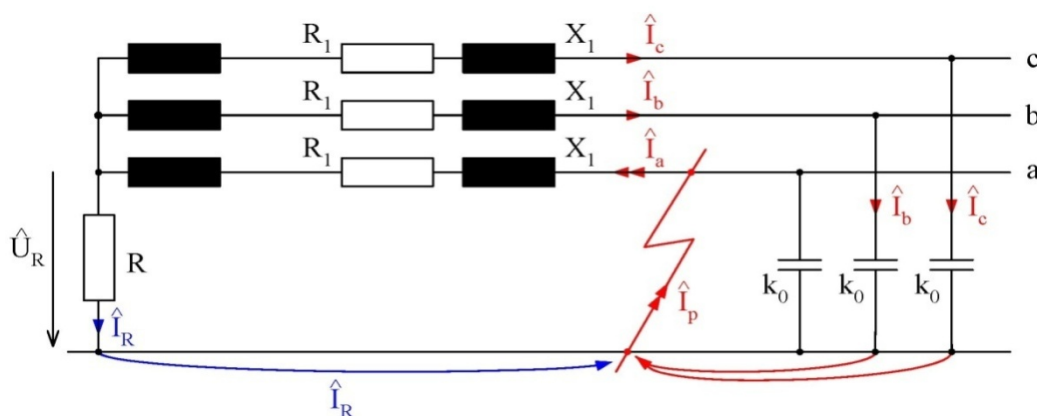
kde R_L je odpor tlumivky a G_0 svodový odpor jedné fáze vedení. Zbytkový proud je pak zřejmý z fázorového diagramu – obr. 22.



Obr. 22 - Fázorový diagram se zbytkovým proudem [13]

Poruchový proud (zbytkový) je u správně vyladěné kompenzované sítě značně nižší než kapacitní proud sítě a má činný charakter. U obloukových zemních poruch jsou tímto výrazně zlepšeny podmínky pro jejich samozhášení, oblouk se přerušuje bez opětovných zápalů, s pomalým nárůstem napětí v postižené fázi. Menší velikost poruchového proudu také příznivě ovlivňuje požadavky na uzemnění v síti. [13]

4.2 Síť s uzlem uzemněným přes rezistor



Obr. 23 - Činný odpor v uzlu trojfázové sítě [13]

Problémy s naladěním zhášecí tlumivky u kapacitně souměrných sítí (městské kabelové sítě) společně s ostatními technickými a ekonomickými problémy vedou k provozování odporově uzemněných sítí – viz obr. 23.

- Jeho hlavní výhody spočívají především v tom, že použitím odporů se velmi zmenší potřebná půdorysná plocha i obestavěný prostor oproti řešení se zhášecí tlumivkou.

- Místem poruchy teče kapacitní proud, který se superponuje k proudu odporem, takže zvyšuje spolehlivost naběhnutí nadproudových ochran pro jednopólové poruchy.
- Úroveň proudu odporem lze přizpůsobit provozované síti. Zatímco nižší hodnoty odporu jsou výhodnější z hlediska přepětí při jednopólových poruchách, nejsou už tolik výhodné na rozsah škod a ovlivnění sousedních zařízení. Výběr velikosti odporu současně s druhem provozu kabelu ovlivňuje nastavení ochran.
- Nevýhodou uzemněného uzlu je mžikové vypínání jednopólových poruch. Na rozdíl od mezifázových poruch, kde se přenáší vliv poruch ze soustavy nižšího napětí do sítě VN a tyto se hlavně projeví proudovými nárazy, jednopólové zkratové proudy mohou mít svůj původ jen ve vlastní síti VN. Tato skutečnost zjednodušuje nastavení ochran pro jednopólové zkraty.

Tento systém uzemnění je vhodný zvláště u kabelových sítí, kde je většina poruch trvalá, takže se snížení poruchového proudu nemůže projevit samozhášením poruch, tak jako při obloukových poruchách u venkovních vedení. Zhášecí tlumivka neomezuje přepětí při vzniku zemních spojení, provoz při zemním spojení namáhá izolaci nepostižených fází zvýšeným napětím a nese sebou riziko vzniku vícenásobných poruch.

Uzel soustavy je uzemněn přes činný odpor. Při vzniku izolační poruchy v síti poklesne napětí na postižené fázi a napětí uzlu vzroste téměř na hodnotu fázového napětí.

Místem poruchy při jednofázovém zkratu protéká součet proudů činným odporem a kapacitního proudu celé sítě. Velikost poruchového proudu závisí na celkové velikosti sítě, ale klesá se vzdáleností místa poruchy od transformátoru. Správnou volbou velikosti odporu R v uzlu se omezuje velikost zkratového proudu. Odstranění poruchy se řeší podobně jako při jednofázovém zkratu.

Podmínka tlumení přepětí se charakterizuje tak, aby jmenovitý proud uzlového rezistoru byl větší, než je kapacitní proud sítě:

$$I_R \geq I_{\text{kap}}$$

$$\frac{U_f}{R} \geq 3\omega k_0 U_f \quad (8.)$$

Pro odpor uzlového rezistoru tedy platí:

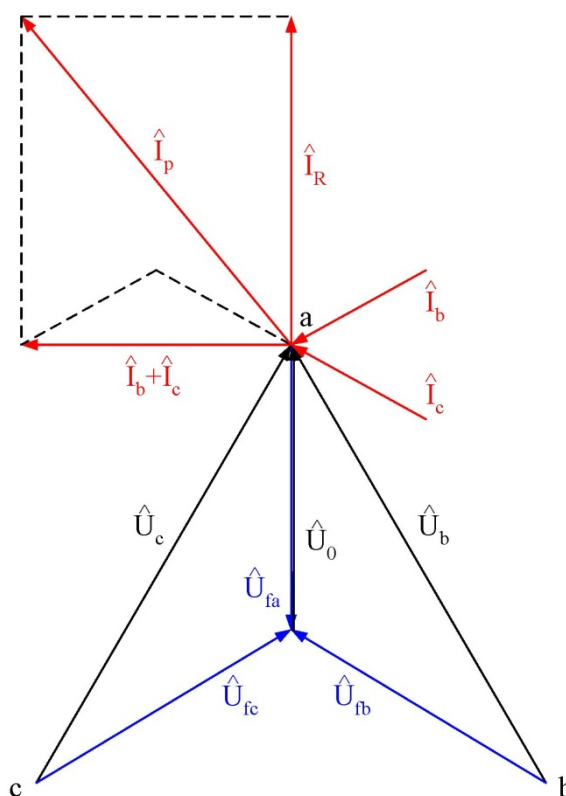
$$R \leq \frac{1}{3\omega k_0} \quad (9.)$$

Maximální proud zemní poruchy je vyjádřen vektorovým součtem jmenovitého proudu uzlového rezistoru a kapacitního proudu sítě (porucha v blízkosti napájecího transformátoru – zanedbány podélné impedance vedení a odpor v místě poruchy):

$$\bar{I}_P = -\left(\frac{1}{R} + j3\omega k_0\right)U_f = \bar{I}_R + \bar{I}_{\text{kap}} \quad (10.)$$

Charakteristickou vlastností provozu s uzlovým rezistorem je, že i přechodná porucha se projeví vypnutím daného vývodu. To je podstatné u kabelových vedení, kde porucha většinou souvisí s poškozením kabelu a další provoz kabelu je tedy nežádoucí.

Fázorový diagram v tomto případě odpovídá obr. 24.



Obr. 24 - Fázorový diagram při zemní poruše v blízkosti transformátoru [13]

U venkovních vedení je však mnoho přechodných poruch bez poškození vedení. Aby se předešlo zbytečným trvalým vypnutím, můžeme použít systém OZ (opětného zapnutí). Jeho působením se značně snižuje dlouhodobé přerušení dodávek způsobených krátkodobou poruchou na venkovním vedení.

Provoz uzlu přes rezistor je výhodné použít z hlediska odběratelů tam, kde se vyskytuje malý počet přechodných poruch a kde je naopak poměrně velký počet následných poruch.

Uzemnění přes rezistor se považuje za nutné, jsou-li kapacitní proudy sítě vyšší než 350 až 400A, u sítě s kapacitními proudy od 5A do asi 350 až 400A je provoz přes uzlový rezistor možný a přípustný. Jestli bude provoz výhodnější, závisí na poměru následných poruch a přechodných poruch nebo vlastně na poměru součtu délek kabelů k venkovnímu vedení. [13]

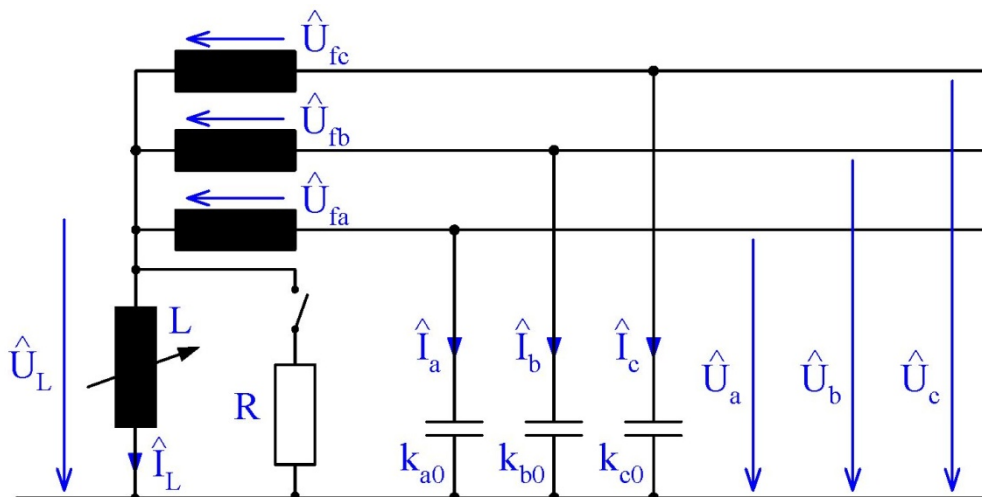
4.3 Sít' s přechodným uzemněním uzlu

Připojením rezistoru dojde ke zvětšení poruchového proudu, čímž se zlepši podmínky pro činnost zemních ochran. I zde platí podmínka, že proud uzlovým rezistorem má být větší než kapacitní proud sítě.

Tedy

$$R \leq \frac{1}{3\omega k_0} \quad (11.)$$

Jedná se o síť s kompenzací zemních kapacitních proudů, kde se při trvajícím zemním spojení připne paralelně k tlumivce rezistor – schéma viz obr. 25.



Obr. 25 - Schéma sítě s přechodným uzemněním uzlu[13]

U některých kompenzovaných sítí se v podstatě ke stejnému účelu používá zatěžování pomocného vinutí zhášecí tlumivky vhodným rezistorem. V tomto případě však činná složka poruchového proudu nebývá větší než kapacitní proud sítě.

V obou situacích se připnutí rezistoru děje automaticky. Podstata automatiky vychází z potřeby spínat rezistor pouze při trvajících zemních spojeních. Po vzniku zemního spojení je tedy před připojením rezistoru nutno vyčkat, jestli zemní spojení zhasne samo. Měřicí obvod automatiky jako zemní spojení vyhodnocuje zvýšení napětí na měřicím vinutí zhášecí tlumivky nad nastavenou hladinu. Časové zpoždění mezi vznikem zemní poruchy a impulzem pro připojení rezistoru je volitelné od 0,5s do 10s. Doba zapnutí odporníku je také nastavitelná, v rozmezí od 1s do 3s. Volí se tak, aby byla dostačující pro působení zemních relé, případně pokryla i přestávku rychlého OZ.

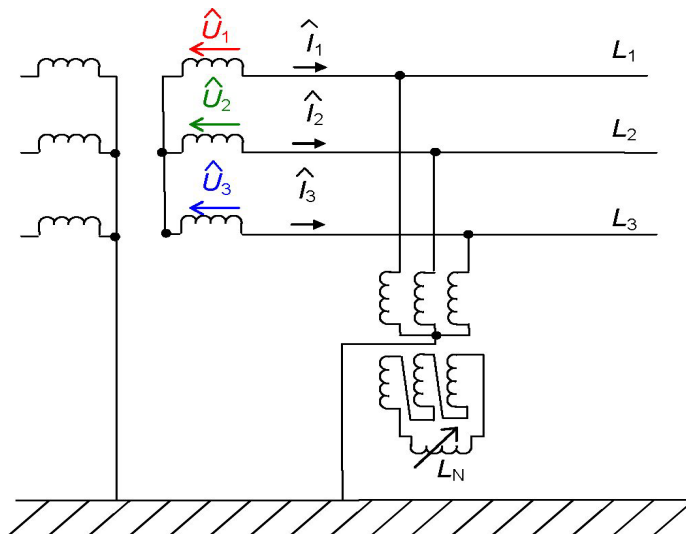
Automatika pracuje ve dvojím režimu, pro síť se signalizací zemních spojení a pro síť s vypínáním při zemních poruchách.

V prvním případě je předpoklad, že síť můžeme po určitou dobu provozovat se zemním spojením a připnutí přídatného rezistoru je nutné pouze na začátku zemního spojení pro zabezpečení spolehlivé činnosti zemních relé vývodů. V následujícím čase až do vypnutí (zániku) zemního spojení zůstává výstup automatiky zablokován. Za konec zemního spojení automatika považuje pokles napětí na zhášecí tlumivce pod nastavenou rozběhovou hodnotu na dobu delší než 10s.

V sítích s vypínáním při zemních poruchách je nutné dávat impuls na sepnutí rezistoru vždy, když se v síti objeví zemní spojení, tedy i opakovaně, pro možnost vzniku následné poruchy. Aby nedošlo k tepelnému ohrožení odporů, obsahuje automatika tepelný model, který sleduje oteplení a chlazení rezistoru a v případě hrozícího nebezpečí rezistoru, je výstup na jeho sepnutí zablokován nebo přerušen. [13]

4.4 Bauchův transformátor

V sítích s izolovaným uzlem se používá Bauchův transformátor stejně jako zhášecí tlumivka. Jeho nespornou výhodou je, že lze připojit i na transformátor, který nemá vyveden nulový bod. Nevýhodou je to, že je nepoměrně nákladnější, z toho důvodu se jeho používání v praxi nerozšířilo.



Obr. 26 - Síť VN s nepřímo uzemněným uzlem přes Bauchův transformátor [13]

Kompenzací kapacitních zemních proudů se tedy docílí:

- místem zemního spojení protéká jen malý zbytkový proud,
- nedochází k větším destrukcím zařízení v místě zemního spojení,
- při zhášení zemního spojení nedochází k přepětím takové velikosti jako u izolované sítě,
- dotykové napětí v místě poruchy není nebezpečné lidskému životu.

Sítě kompenzované pomocí zhášecí tlumivky umožňují teoreticky provozovat síť i se zemním spojením po dobu potřebnou k nalezení místa poruchy.

Nevýhodou je, že veškeré přístroje a zařízení je potřeba dimenzovat na plnou izolaci sítě, protože při zemním spojení vzroste napětí uzlu na hodnotu fázového napětí a napětí zdravých fází na hodnotu sdruženého napětí. [13]

4.5 Vliv kompenzace na funkci zemních směrových ochran důlních sítí VN.

Kompenzací zemních kapacitních proudů zhášecími tlumivkami (Petersonovými cívkami) dojde sice k výraznému hodnotovému snížení zemního proudu v místě poruchy a tím i k nižšímu uvolnění destrukční energie v místě poruchy, v žádném případě však vykompenzovaný zemní proud na hodnotu $I_0 \leq 7 \text{ A}$ nemůže zabránit iniciaci výbušné směsi. Kompenzací zemního kapacitního proudu indukčním proudem zhášecí cívky, může zemní spojení v místě poruchy na kabelovém vedení i zaniknout a nadále zůstat v provozu, takto poškozené vedení v podzemí dále provozovat, je však značným bezpečnostním rizikem. Je proto nutno opakovaně připomenout, že kompenzací kapacitního proudu při zemním spojení zhášecí tlumivkou (Petersonova cívka) dochází k výraznému ovlivnění hodnoty a změně vektorové orientace snímaných reziduálních zemních proudů I_0 , které jsou spolu s nulovou složkou napětí U_0 vstupními poruchovými veličinami zemních směrových ochran (dále ochran).

Kompenzovaný jalový zemní proud I_L procházející zemí a porušenou fází má opačný smysl než poruchový jalový zemní proud kapacitní I_{0C} , v místě snímání součtovým měřicím transformátorem proudu (dále SMTP) je proto vektorový součet fázových proudů o kompenzovaný proud I_L menší. V

některých místech sítě má i nulovou hodnotu a směrem ke zdroji mění smysl vektorové orientace. Aby ochrana mohla správně reagovat a dávat popud k vypnutí svého chráněného úseku se zemní poruchou, musí být kompenzaci „vynulovaná“ nebo hodnotově a smyslově změněná poruchová veličina reziduálního zemního proudu pro ochranu doplněna o jinou složku proudu, která se kompenzací nemění. Z uvedeného důvodu se k zhášecí cívice v kompenzovaných sítích VN většinou paralelně připojuje výkonový činný odpor, aby i po vykompenzování aktivovala činná složka proudu I_c zemní směrovou ochranu. Kompenzací zemních proudů s vnucováním činné složky dojde ke změně fázového úhlu mezi poruchovou veličinou nulové složky napětí U_0 a reziduální nulové složky proudu I_0 . Fázový úhel nastavení ochrany bude muset být na vývodních koncových úsecích sítě nastaven se středem oblasti působení kolem hodnoty 0° až $+20^\circ(\text{ind.})$, v ostatních místech sítě na fázový úhel, podle zpracované rozvahy hodnotově výše a vektorové orientace snímané reziduální nulové složky proudu. Ochrana pak musí být konstrukčně řešena tak, že mimo fázový úhel reaguje především na přítomnost činné složky proudu I_c , která protéká postiženou fází do místa zemního spojení a zemí zpět ke zhášecí tlumivce do uzlu napájecího transformátoru sítě. V současné nekompenzované síti 6 kV jsou vestavěné ochrany ve vypínačích typu ROK 6P s oblastí působení kapacitního charakteru zemního proudu I_0 , v sítích kompenzovaných budou proto nefunkční. Jejich technické provedení bylo výrobcem řešeno výhradně pro síť izolované a nekompenzované s pevně nastaveným fázovým úhlem I_0 cca -50° až -90° proti U_0 . Pro úplnost je nutno dodat, že vypínače ROK 6P tvoří více než 90% všech provozovaných vysokonapětových vypínačů v dole, dále že výrobce současně provozovaných ochrany v ROK 6 již neexistuje.

4.5.1 Negativní vliv zhášecí cívky při přerušovaných zemních spojeních.

Zhášecí cívka má mimo příznivý vliv výrazného snížení hodnoty základní harmonické zemního proudu i nepříznivou vlastnost spočívající v podpoře vzniku oscilací (rozkmitání sítě), což následně nutně prodlužuje dobu trvání přerušovaného zemního spojení a dobu trvání přepětových jevů v síti. Fázové zemní poruchy v kabelových sítích VN jsou charakteristické tím, že před jejich ustáleným stavem (trvalém vodivém spojení fáze se zemí nebo chráněnou neživou částí elektrického zařízení) předchází přerušovaná zemní spojení. V důsledku toho, má přechodový zemní proud neharmonický průběh způsobující přepětí v síti a nepříznivě ovlivňuje funkci ochrany. Výrobci moderních digitálních ochrany řeší tento problém potlačením harmonických složek, dále samostatným modulem, který i v přerušovaném přechodovém režimu zemního spojení dovede v krátkém čase správně vyhodnotit směr místa poruchy. Problém přepětí je řešitelný doplněním důlní sítě svodiči přepětí, problém technického vyřešení odstranění chybných funkcí je u současně používaných ochrany v ROK 6P neproveditelné.

4.5.2 Vyřazení funkce měřiče izolace důlní sítě VN.

Kompenzaci dojde přes zhášecí cívku ke galvanickému spojení sítě se zemí, čímž nelze kontinuálně vyhodnocovat a měřit za provozu její izolační odpor. Nelze tak naplnit požadavek §231a (4) c) vyhlášky č. 22/1989Sb. ČBÚ. V OKD je kontinuální měření izolace v důlních sítích VN dlouhodobě provozováno a hodnoceno jako významný bezpečnostní prvek, jeho vyřazení lze bez nadsázky považovat za nebezpečný krok v oblasti bezpečnosti důlního provozu elektrických zařízení VN.

Řešení spočívající v připojování kompenzační cívky až v okamžiku vzniku zemního spojení je netechnické, které způsobí víc negativ než pozitiv. Negativy jsou například nutná časová blokování vypínacích funkcí ochrany po dobu doladění zhášecích cívek, zvýšení pravděpodobnosti vzniku rozkmitání sítě přechodovými neharmonickými proudy v okamžiku připojení zhášecí cívky a tím chybnému výběru místa poruchy ochrany a v konečném důsledku prodloužení času vypnutí vadného úseku sítě.

4.5.3 Bezpečnostní riziko při porušení volně uloženého a přístupného hlavního zemního vedení v dole.

Zemní proud zhášecí tlumivky při vzniku zemního spojení může v místě přerušení celistvosti hlavního zemního vedení způsobit nebezpečné jiskření, elektrický výboj a nebezpečné dotykové

napětí. Pokud není v běžně přístupných místech dolu hlavní zemnicí vedení (ochranný PE vodič) součástí kabelu, je kompenzace zdrojem vzniku bezpečnostního rizika.

V podzemí OKD jsou sítě VN (mimo napájení pohyblivých a přemístitelných zařízení) z 90% tvořeny 3 vodičovými kabely a ochranný vodič tvoří volně přístupné Cu lano. Ustanovení § 231b o způsob kontroly neporušenosti obvodu hlavního zemnicího vedení lze plnit pouze vizuální kontrolou, měření jeho neporušené celistvosti je v důlních podmínkách značně obtížné.

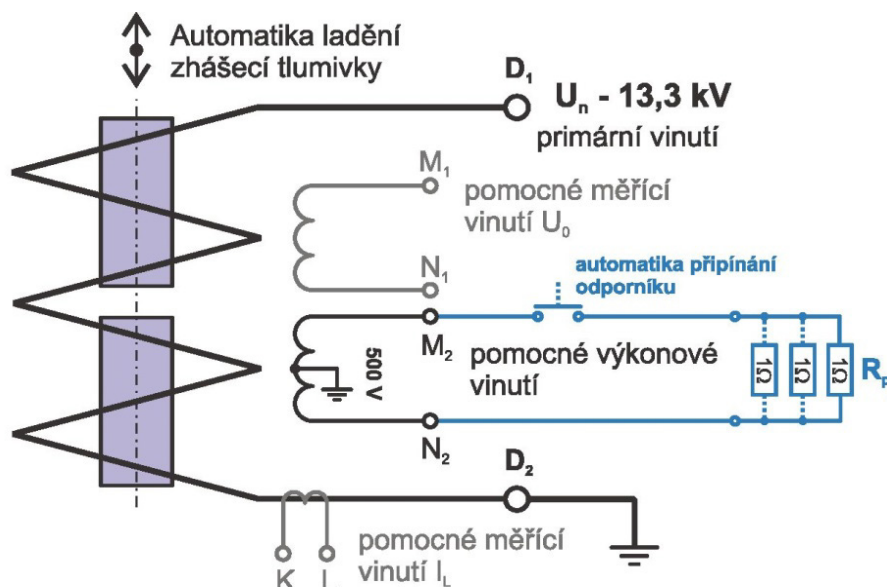
V německých plynujících uhelných dolech je dovolen maximální zemní proudů 100A, od jeho kompenzace může však být upuštěno v případech, kdy důlní síť VN je vybavena zemními ochranami s časem vypnutí závislém na jeho hodnotě (např. při I_0 do 10A - 6s., nad 20 do 50A - 1,5s).

5 Automatika ladění tlumivky

5.1 Zhášecí tlumivka a rezonanční křivka

Zhášecí tlumivka se umísťuje v napájecích rozvodnách distribuční soustavy a připojuje se k uzlu napájecího transformátoru. V situaci, kdy uzel transformátoru není vyveden, je možno zhášecí tlumivku připojit k uměle vytvořenému uzlu třífázové nulové tlumivky popřípadě k uzlu nezatíženého pomocného transformátoru v zapojení YNd1, které jsou připojeny k přípojnici hlavní napájecí rozvodny se samostatnou výstrojí jako odběrová odbočka. Množství zhášecích tlumivek v napájecí stanici se určuje podle počtu napájecích transformátorů, velikosti kapacitního proudu napájené sítě a počtu samostatně provozovaných přípojníc. Pro správné nastavení proudu zhášecí tlumivky a indikaci vývodu se zemním spojením je potřebné pro každou tlumivku připojenou k transformátoru 110 kV/VN s kapacitním proudem venkovní nebo smíšené sítě větším než 50A zajistit také samočinnou regulaci vyladění tlumivky s možností manuální regulace proudu tlumivkou, zobrazení ukazatele napětí na tlumivce i proudového nastavení tlumivky pro pozorování vyladěného stavu a automatiku připínání odporu pro zvýšení činné složky poruchového proudu (většinou stavebnicový odporník na výkonovém vinutí tlumivky). Zjednodušené schéma běžně používané zhášecí tlumivky je znázorněno na Obr. 27. Tato zhášecí tlumivka se skládá z primárního vinutí, dvou pomocných měřicích vinutí a jednoho výkonového vinutí. Primární vinutí s nominální hodnotou napětí 13,3kV je nastavováno automatikou ladění do žádaného stavu kompenzace. K pomocnému měřicímu vinutí KL připojujeme přístrojový transformátor proudu určený k měření kompenzačního proudu, druhé pomocné vinutí M_1N_1 se využívá k měření uzlového napětí (netočivé složky napětí) U_0 - tedy napětí mezi nulovým bodem transformátoru a zemnicí soustavou.

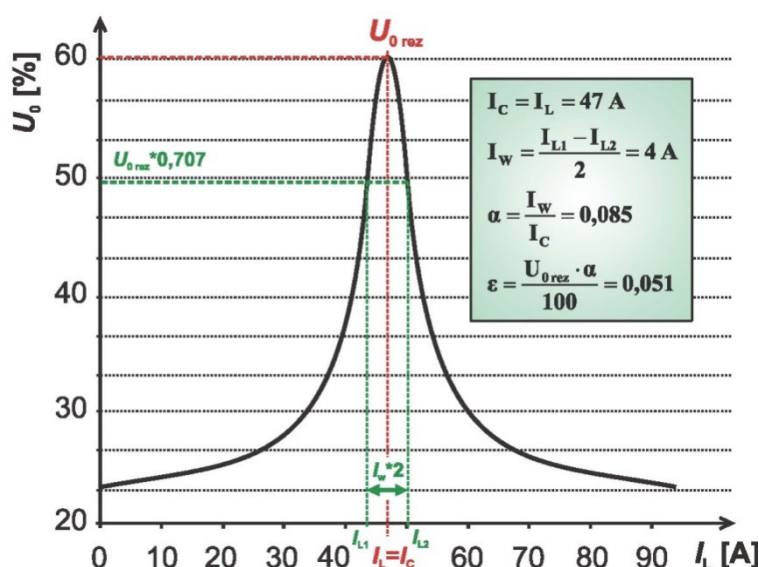
Pro připojení sestavy pomocných (stavebnicových) odporníků se používá výkonové vinutí M_2N_2 s nominálním napětím 500V. Sestava umožňuje konfiguraci odporníků dle přání provozovatele. Rozšířená sestava tří paralelních jednoohmových odporníků, které jsou připojovány do paralelní kombinace pomocí stykačů nebo manuálně je uvedena na (Obr. 27). Z důvodu masivního nasazení hlavně digitálních ochran se doporučuje nastavení stavebnicového odporníku na hodnotu 1Ω. Připojování pomocného odporníku se provádí na základě kritéria U_0 s doporučeným nastavením v hladině zhruba 2kV až 3kV pro co nejlepší citlivost zemních ochran.



Obr. 27 – Schematické znázornění zhášecí tlumivky s automatikou připínání pomocného odporníku k výkonovému vinutí [8]

Nezbytným předpokladem pro správnou kompenzaci kapacitního proudu je znalost rezonanční křivky soustavy. Tato rezonanční křivka vyjadřuje závislost uzlového napětí U_0 na kompenzačním

proudu procházejícím tlumivkou I_L pro danou oblast distribuční soustavy. Určování rezonanční křivky se řeší postupným laděním zhášecí tlumivky, která se připojí k soustavě bez zemního spojení při postupném odečítání hodnot U_0 a I_L . Zjišťování rezonanční křivky můžeme provádět pouze u soustav nesymetrických, jako např. soustavy s vysokým podílem venkovního vedení, u kterých se projevuje značná nesymetrie fázových napětí vůči zemi. V kabelových sítích, které se projevují naopak, tzn. dobrou symetrií fázových napětí (plochá rezonanční křivka), je podstatné pro zajištění správné funkce zhášecí tlumivky a pro zjištění charakteristických hodnot vytvořit umělou nesymetrii soustavy. Na Obr. 28 je uveden příklad rezonanční křivky. Z této charakteristiky následně zjistíme potřebné charakteristické hodnoty sítě, jako je: velikost kapacitního proudu provozované sítě I_C , který se rovná kompenzačnímu proudu v místě rezonančního napětí U_{0rez} , následně pak hodnotu svodového proudu I_W , činitel nesymetrie sítě ε a činitel útlumu sítě α . Pro názornost jsou tyto charakteristické hodnoty sítě uvedeny pro příslušnou rezonanční křivku na Obr. 28.



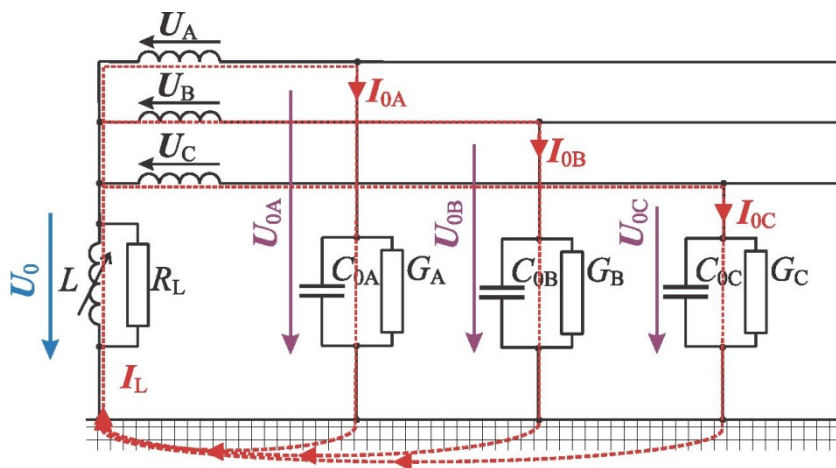
Obr. 28 - Příklad rezonanční křivky [8]

Při provozu soustavy v kompenzovaném stavu nastavujeme zhášecí tlumivku na rezonanční napětí $U_{0 rez}$, kdy v průběhu tohoto stavu zcela kompenzuje kapacitní proud sítě I_C , jak také z uvedené rezonanční křivky vyplývá. Je nutné však říci, že 100% kompenzace základní harmonické kapacitního proudu soustavy není možná vzhledem k nesymetrii příčných admitancí. V případě nesymetrické soustavy bude úroveň kompenzace kapacitního proudu závislá nejen na naladění zhášecí tlumivky, ale i na fázi postižené ZS. Dnes je trendem provozování distribuční sítě zcela vykompenzované, kdy v místě poruchy prochází nejmenší zbytkový proud. V některých případech se však lze setkat i s provozem soustavy jako lehce podkompenzované ($I_L < I_C$) nebo překompenzované ($I_L > I_C$). Zvláště v případě sítí značně nesymetrických a u sítí s malými činnými odpory dosahuje napětí mezi nulovým bodem transformátoru a zemnicí soustavou U_0 dosti vysoké úrovně, přičemž zde dochází k namáhání nulového bodu napájecího transformátoru a vypínačů. Z tohoto důvodu se dříve pro snížení zmíněného namáhání tlumivka rozladila, načež došlo vlivem strmosti rezonanční charakteristiky k poklesu napětí v uzlu transformátoru. I dnes se můžeme setkat s provozem v mírně podkompenzovaném, případně překompenzovaném stavu, dle místních podmínek a zvyklostí provozu. V některých evropských zemích jako je například Finsko, se používá i kompenzace decentralizované. Toto se řeší tak, že na každém vývodu je umístěna samostatná tlumivka, která je pevně nastavena tak, aby kompenzovala jen kapacitní proudy tohoto vývodu. Pokud dojde k odpojení vývodu, odpojí se zároveň i zhášecí tlumivka, čímž se bez jakékoli regulace udržuje žádaný stupeň kompenzace. Nevýhodou tohoto decentralizovaného řešení je, že lokalizace místa poruchy je ještě složitější než v případě u nás používané centralizované kompenzace.

U všech doposud používaných zhášecích tlumivek je nevýhodou možnost kompenzování kapacitního proudu jen o frekvenci základní harmonické, ostatní frekvence proto nejsou kompenzovány. Značný podíl 3., 5. a 7. harmonické v kapacitním proudu je zvláště v rozsáhlých, průmyslových či hustě obydlených oblastech, kde tyto nekompenzované složky vyššího řádu často převyšují velikost zbytkového proudu základní harmonické. Celkový zbytkový proud procházející místem poruchy pak v těchto případech může dosahovat nebezpečných úrovní. Této nedokonalosti se pak dá s výhodou využívat při lokalizaci zemního spojení. [8]

5.2 Ladění zhášecích tlumivek

Ladění zhášecích tlumivek v našich sítích je zpravidla automatické. Automatická řídicí jednotka má za úkol určit a nastavit hodnotu L tak, aby proud \hat{I}_p byl minimální. Tento bod také nazýváme rezonanční bod soustavy, protože napětí na uzemnění je maximální. V takovém stavu je soustava naladěna. Požadavek pro vyladěný stav je dosažení maxima napětí \bar{U}_0 na zhášecí tlumivce. Po zapnutí automatiky, za provozu, při změně konfigurace sítě (připnutí nebo odepnutí vedení) dochází vždy k ladění. Je důležité, aby se eliminoval vliv přechodných změn napětí \bar{U}_0 , které nesouvisí s rozladěním sítě, proto vyhodnotí automatika jako popud pro rozběh jen změny, které mají delší trvání, než nastavené časové zpoždění rozběhu.



Obr. 29 - Schéma 3-f systému uzemněného přes zhášecí tlumivku [8]

Napětí \bar{U}_0 můžeme určit z náhradního schématu kompenzované sítě, kde jsou tentokrát uvažovány parametry skutečné neidealizované sítě. Každý kompenzovaný třífázový vn systém lze nahradit s dostatečnou přesností schématem uvedeným na Obr. 29.

Využitím prvního a druhého Kirchhoffova zákona v uvedeném schématu odvodíme obecnou rovnici pro relativní netočivé napětí.

Napětí na tlumivce je $U_0 = -Z_L \cdot I_L$ a proud tlumivkou

$$\bar{I}_L = \bar{I}_{0A} + \bar{I}_{0B} + \bar{I}_{0C} = \bar{U}_{0A} \bar{Y}_A + \bar{U}_{0B} \bar{Y}_B + \bar{U}_{0C} \bar{Y}_C, \quad (12.)$$

$$\bar{I}_L = (\bar{U}_A + \bar{U}_0) \bar{Y}_A + (\bar{U}_B + \bar{U}_0) \bar{Y}_B + (\bar{U}_C + \bar{U}_0) \bar{Y}_C. \quad (13.)$$

Dosazením za fázová napětí $\bar{U}_A = \bar{U}$, $\bar{U}_B = a^2 \bar{U}$, $\bar{U}_C = a \bar{U}$ bude

$$\begin{aligned} \bar{I}_L &= (\bar{U} + \bar{U}_0) \bar{Y}_A + (a^2 \bar{U} + \bar{U}_0) \bar{Y}_B + (a \bar{U} + \bar{U}_0) \bar{Y}_C, \\ \bar{I}_L &= \bar{U} (\bar{Y}_A + a^2 \bar{Y}_B + a \bar{Y}_C) + \bar{U}_0 (\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C). \end{aligned} \quad (14.)$$

Dosažením proudu tlumivkou do výrazu pro její napětí a úpravou

$$\begin{aligned}\bar{U}_0 &= -\bar{Z}_L[\bar{U}(\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C) + \bar{U}_0(\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C)], \\ \bar{U}_0 &= -\frac{\bar{Z}_L \bar{U}(\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C)}{\bar{Z}_L(\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C) + 1}, \\ \bar{U}_0 &= -\frac{\bar{U}(\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C)}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \frac{1}{\bar{Z}_L}},\end{aligned}\tag{15.}$$

Pak poměrnou hodnotu \bar{u}_0 lze psát

$$\bar{u}_0 = \frac{\bar{U}_0}{\bar{U}} = -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \frac{1}{\bar{Z}_L}},\tag{16.}$$

Kde

$$\frac{1}{\bar{Z}_L} = \frac{1}{R_L} - \frac{j}{\omega L} \quad \text{a} \quad \bar{Y}_n = G_n + j\omega C_{0n}, \quad n = A, B, C\tag{17.}$$

Pro rozklad příčných admitancí jednotlivých fází na susceptanci B a kondukcí G

$$\begin{aligned}\bar{u}_0 &= -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \frac{1}{\bar{Z}_L}}, \\ \bar{u}_0 &= -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C}{j\omega(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C}) - \frac{j}{\omega L} + G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}},\end{aligned}\tag{18.}$$

$$\begin{aligned}\bar{u}_0 &= -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C}{j\omega(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C})} \cdot \frac{j\omega(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C})}{j\omega(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C}) - \frac{j}{\omega L} + G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}}, \\ \bar{u}_0 &= -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C}{j\omega(C_A + C_B + C_C)} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega^2 L(C_A + C_B + C_C)} - j\frac{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}}{\omega(C_A + C_B + C_C)}},\end{aligned}\tag{19.}$$

Může být výraz (15) dále zjednodušen definicí následujících poměrných parametrů sítě:

Rozladění v

$$v = -\frac{j\omega(C_A + C_B + C_C) - \frac{j}{\omega L}}{j\omega(C_A + C_B + C_C)}$$

$$v = -\frac{1}{\omega^2 L(C_A + C_B + C_C)} - 1 \quad (20.)$$

Které je bezrozměrnou skalární veličinou stejně jako **tlumení d**

$$d = \frac{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}}{\omega(C_A + C_B + C_C)} \quad (21.)$$

a dále bezrozměrný vektor **nesymetrie k_0**

$$\bar{k} = \frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2} \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{j\omega(C_A + C_B + C_C)} \quad (22.)$$

Relativní netočivá složka napětí pak může být vyjádřena jako:

$$\bar{u}_0 = \frac{\bar{k}}{v - jd}, \quad (23.)$$

Jejíž amplituda bude

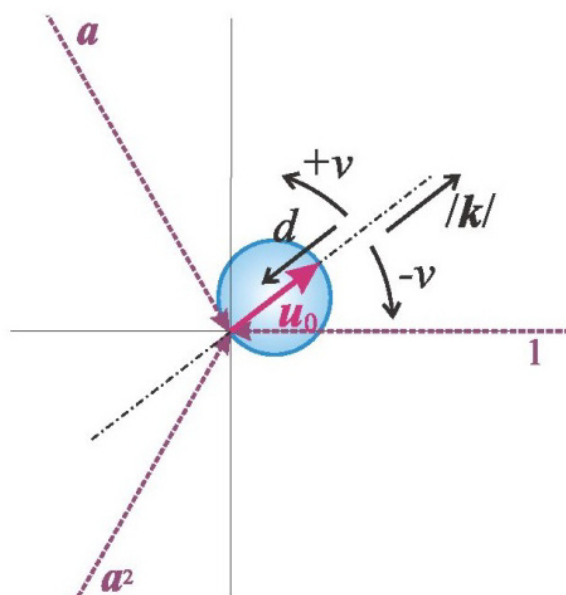
$$|\bar{u}_0| = \frac{|\bar{k}|}{\sqrt{v^2 + d^2}}, \quad (24.)$$

Z výše uvedeného vztahu tedy vyplývá, že polohovou křivkou \bar{u}_0 v komplexní rovině je kružnice procházející středem souřadného systému a její poloměr je dán poměrem celkové kapacitní nesymetrie a tlumení sítě obr. 30. Ve vyladěném stavu je $v = 0$ a platí tedy:

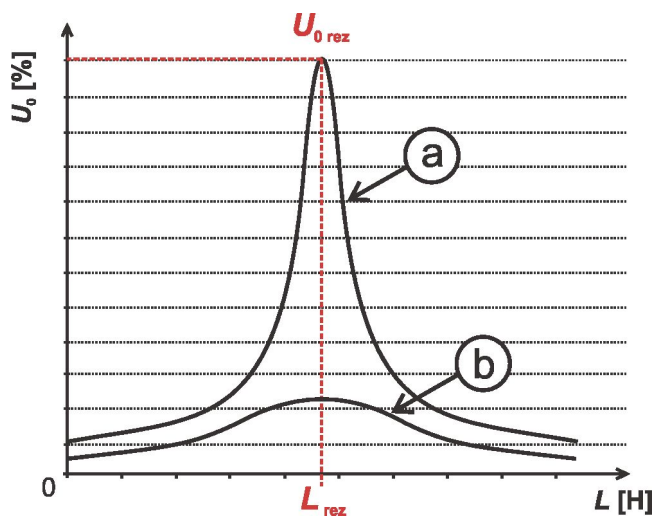
$$\bar{u}_{0\max} = \frac{\bar{k}}{jd} = \frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2} \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{j\omega(C_A + C_B + C_C)} \frac{-j\omega(C_A + C_B + C_C)}{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}},$$

$$\bar{u}_{0\max} = -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2} \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}} \quad (25.)$$

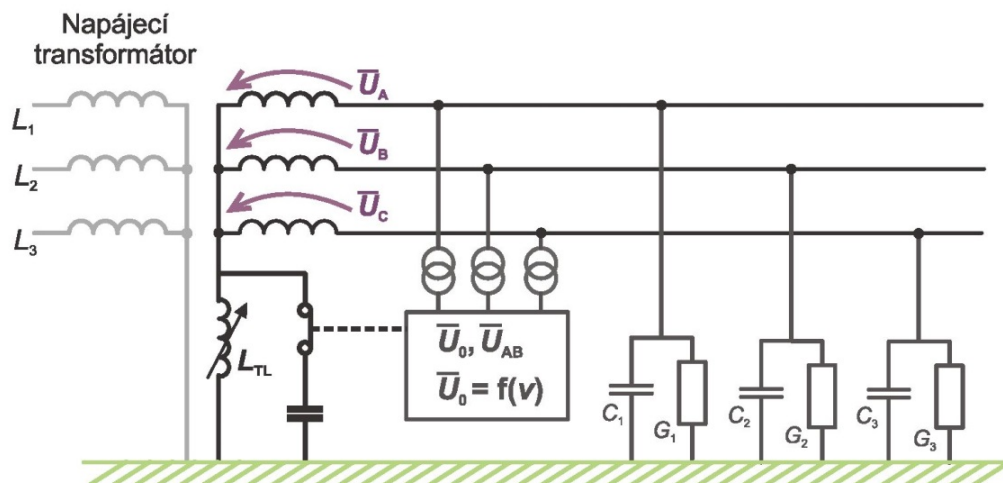
$$|\bar{u}_{0\max}| = \frac{|\bar{k}|}{d} \quad (26.)$$

Obr. 30 - Geometrické místo \bar{u}_0 v komplexní rovině [8]

Většina dnešních ladících automatik vyhledává maximální hodnotu $|\bar{u}_{0max}|$, tzn., že hledá maximum rezonanční křivky (Obr. 30). Tato metoda má však značnou nevýhodu v tom, že pro získání měřitelné hodnoty $|\bar{u}_{0max}|$ potřebujeme výraznou nesymetrii, což je problémem zvláště v sítích se značným podílem kabelů, jak vyplývá z rezonančních křivek zobrazených na Obr. 31. Tento problém řeší novější systémy měřením znázorněné polohové křivky pomocí změny rozladění (parametru v), kdy při malém napětí $|\bar{u}_{0max}|$ jev blízkosti rezonančního bodu sítě ještě dobře technicky měřitelná úhlová změna \bar{u}_0 . Připojením kapacitní reaktance do nuly systému lze provést změnu úhlu (Obr. 32). K přesnému určení rezonančního bodu sítě poté stačí tři body na polohové křivce. Tento druh ladění však vyžaduje tlumivku s dosti přesnou a citlivou regulací indukčnosti.



Obr. 31 - Rezonanční křivky - a) pro venkovní vedení, b) pro kabelovou síť [8]



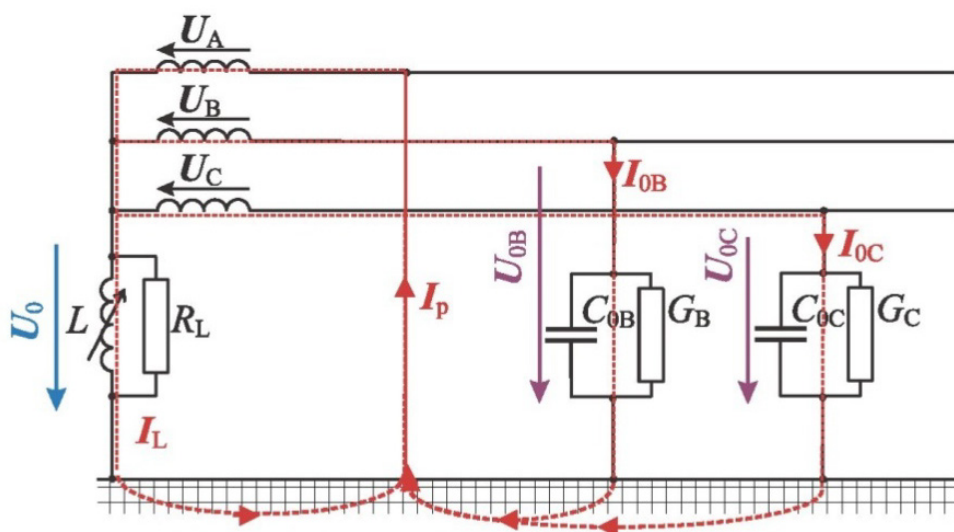
Obr. 32 - Připnutí reaktance pro stanovení oblasti křivky $u_0 = f(v)$ [8]

Další možností je ladění sítě pomocí krátkodobé injektáže proudu v nulovém bodě, který má za následek změnu netočivého napětí. Pomocí měření amplitudy a úhlu netočivého napětí před a během injektáže můžeme určit tři základní parametry systému - rozladění v , nesymetrii k , a útlum d . Posunutím nulového bodu sítě se docílí změnou měřených veličin zapojením aktivních nebo pasivních komponent do pomocného vinutí zhášecí tlumivky a poté není nutná potřeba přesného ladění zhášecí tlumivky.

Na Obr. 33 jsou znázorněny poměry v síti při zemním spojení, ze kterého je zřejmé, že porucha je charakteristická změnou napětí uzlu sítě U_0 .

Při kovovém zemním spojení (odpor poruchy $R_p = 0$) má napětí uzlu velikost $U_0 = -U$ a pro proud platí

$$\bar{I}_p = U\bar{Y}_L + \bar{Y}_B(\bar{a}^2 U - U) + \bar{Y}_C(\bar{a}U - U), \quad (27.)$$



Obr. 33 - Rozložení proudů při jednofázovém zemním spojení [8]

Dosazením za netočivé admitance a úpravou celé rovnice dostaneme pro poruchový proud

$$\begin{aligned}\bar{I}_p &= U(\bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C) - U\bar{Y}_L - U(\bar{Y}_B + \bar{Y}_C) + U\bar{Y}_A - U\bar{Y}_A, \\ \bar{I}_p &= U(\bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C) - U\left(\frac{1}{R_L} - \frac{j}{\omega L}\right) \\ &\quad - U(G_A + G_B + G_C) - jU(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C}),\end{aligned}\quad (28.)$$

$$\bar{I}_p = I_{rest} + j(I_L - I_C) + \Delta I_C, \quad (29.)$$

kde I_{rest} je zbytkový proud zemního spojení

$$I_{rest} = -U(G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}), \quad (30.)$$

I_C je kapacitní proud sítě

$$I_C = U(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C}), \quad (31.)$$

ΔI_C je kapacitní proud způsobený nesymetrií sítě

$$\Delta I_C = U(\bar{Y}_A + \bar{a}^{-2}\bar{Y}_B + \bar{a}\bar{Y}_C), \quad (32.)$$

I_L je induktivní proud zhášecí tlumivky

$$I_L = U\frac{1}{\omega L}, \quad (33.)$$

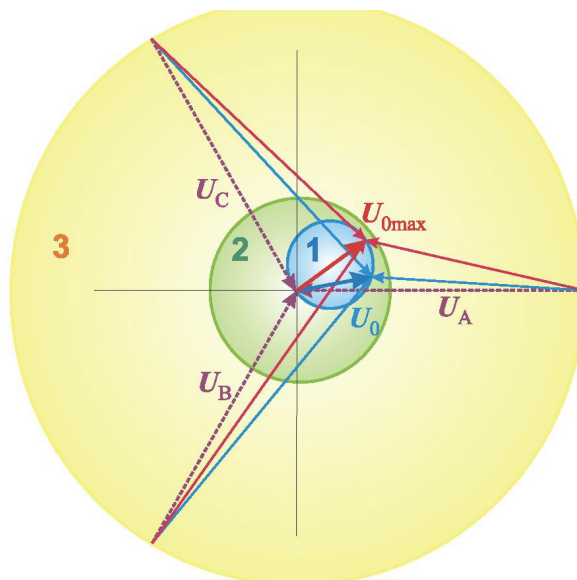
Pak můžeme i jednotlivé poměrné parametry sítě zapsat pomocí těchto proudů

$$\textbf{Rozladění:} \quad v = \frac{I_L - I_C}{I_C}, \quad (34.)$$

$$\textbf{Tlumení:} \quad d = \frac{I_{rest}}{I_C}, \quad (35.)$$

$$\textbf{Nesymetrie:} \quad \bar{k} = \frac{\Delta I_C}{I_C}, \quad (36.)$$

Je zřejmé, že porucha se projeví změnou poměrných parametrů sítě a změní tedy i hodnotu netočivého napětí \bar{U}_0 . Kritériem poruchy v síti je pak poloha vektoru \bar{U}_0 v komplexní rovině (viz Obr. 34).



Obr. 34 - Vymezení oblastí U_0 v komplexní rovině [8]

Oblast 1 je oblast kolísání \bar{U}_0 při malých změnách přirozených nesymetrií sítě a vyladěné sítě. Oblast 2 představuje možnost změn \bar{U}_0 při větších změnách v síti (např. změny rozsahu a konfigurace sítě). V případě, že se fázor netočivého napětí dostane do této oblasti, spustí se automatika pro ladění zhášecí cívky. Pokud se vektor \bar{U}_0 posune do oblasti 3, jedná se o zemní spojení v síti.

V současnosti většina distribučních sítí 22kV v ČR používá k indikaci zemního spojení měření netočivé složky napětí \bar{U}_0 v uzlu transformátoru pomocí měřících transformátorů napětí, jejichž sekundární vinutí jsou zapojena do otevřeného trojúhelníku. [8]

6 Praktická část

V této části diplomové práce bych se chtěl věnovat jednak výpočtům parametrů vedení podstatných pro další výpočty a návrh zhášecí tlumivky a jednak následnému výběru vhodné automatiky ladění této zhášecí tlumivky.

6.1 Výpočtová část

V této výpočtové části, se zpočátku zaměřím na popis jednotlivých částí sítě 22kV. Tzn. typ použitých vodičů, typ použitých stožárů.

Následně tyto parametry využiju k potřebným výpočtům, pro zjištění celkového kapacitního proudu a potřebného výkonu zhášecí tlumivky.

6.1.1 Použité vodiče

6.1.2 Použité vodiče pro venkovní vedení

Vodiče a zemní lana jsou funkčně nejdůležitější částí venkovního vedení a také představují ekonomicky rozhodující prvek venkovního vedení. Volba vodičů a lan určuje nejen výši nákladů, ale také konstrukci stožárů a především bezpečnost provozu celého vedení. Protože jsou vodiče vystaveny různým klimatickým podmínkám - větru, dešti, námraze, změnám teploty, chemickým vlivům - jsou požadavky na ně kladené také různé a často protichůdné:

- malá měrná hmotnost vodičů kvůli dopravě a montáži, ale velká, aby nebyly příliš vychylovány větrem
- malý průměr vodičů omezující účinky větru, ale velký pro snížení ztrát korózou
- velká mechanická pevnost
- odolnost proti chemickým vlivům a změnám teploty
- odolnost proti chvění
- nízká cena

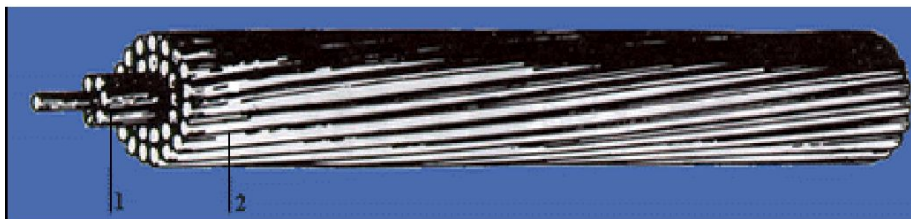
Materiál a konstrukce použitých vodičů:

Hliníkové vodiče

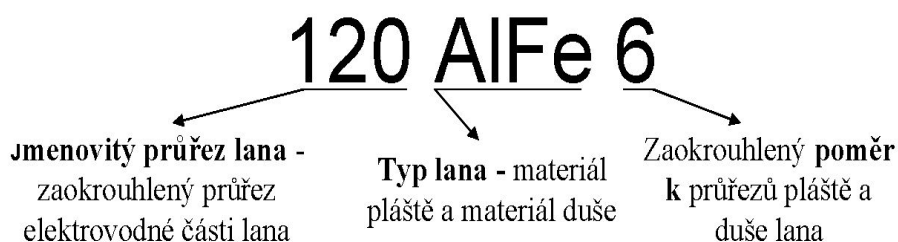
Hliník je cenově dostupný materiál s dobrou vodivostí, ale malou pevností (vlastnosti v kapitole). Pro účely venkovních vedení, kde je mechanická pevnost vodiče rozhodující lze hliníkových vodičů použít jen v kombinaci s nosným prvkem (kombinovaná lana).

Železné vodiče

Konduktivita železa je nízká, jen $7 \text{ až } 10 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$, ale díky tomu, že je laciné a má dobré mechanické vlastnosti, se s ním jako s vodivým materiálem setkáváme. Jeho použití je však vhodné jen na vedení, která jsou jen občas nebo nepatrně zatížena - např. zemní lana a svody hromosvodů, nebo tam, kde plní i funkci nosného prvku vodiče - kombinovaná lana.



Obr. 35: Konstrukce kombinovaného lana 1 - ocelová duše, 2 - hliníkový plášť

Označování kombinovaných lan:

Jsou to lana ze dvou materiálů, z nichž jeden má velkou pevnost a tvoří nosnou část lana - tzv. duši, druhý má velkou vodivost a tvoří elektrovodnou část lana - plášť. Lze použít různých kombinací kovů: Al + Fe, slitiny Al (aldrey, aludur, almelec) + Fe, Cu + Fe, Cu + bronz. Nejčastěji se používají kombinovaná lana AlFe (ocelová duše a hliníkový plášť) nebo AldFe (ocelová duše a plášť ze slitiny 98,7%Al, 0,5%Mg, 0,5%Si, 0,3%Fe). Tato lana nejlépe odpovídají požadavkům na venkovní vodiče: spojují dobrou vodivost hliníku s velkou pevností oceli (AlFe lano je pevnější než Cu lano stejné vodivosti), vodivá část lana má velký průměr což omezuje korózu a tvar mezikruží což odpovídá rozložení proudové hustoty v průřezu, kdy ocelovou duší prochází zanedbatelný díl proudového zatížení. Nevýhodou je pouze náchylnost k vibracím, proti kterým je nutno tato lana chránit. [10]

Tab. 2 – Parametry použitých hliníkových lan s ocelovou duší AlFe6

Parametry hliníkových lan s ocelovou duší AlFe 6								
Jmenovitý průřez lana (mm ²)	Průměr lana (mm)	Hmotnost 1 km délky (kg)	Největší odpor 1 km délky (Ω)	Zaručená pevnost lana (N)	R [W/km]	X [W/km]	I _{dov} [A]	k [-]
120	15,65	509,2	0,234	41900	0,200	0,417	387	94
150	17,25	619,4	0,193	50200	0,156	0,407	459	94
185	19,20	765,5	0,156	62300	0,125	0,400	535	94

Silové kabely**Klasické kabely - s papírovou izolací.**

Původní konstrukce kabelů používá papírovou izolaci, která je tvořena ovinutím jádra papírovými pásky. Tyto vytvářejí vrstvu o potřebné elektrické pevnosti, která je impregnována kabelovou hmotou, jejímž základem jsou minerální oleje. V případech, kdy kabel bude mít po uložení konce v různé výšce, používá se nemigrující (nestékavá) izolace, jejíž impregnant není při provozní teplotě tekutý. Žíly jsou stočeny a opatřeny společným olověným pláštěm. V 60. letech se používaly také kabely s hliníkovým pláštěm, aby se ušetřilo olovo, ale toto provedení se neosvědčilo. Na plášti obvykle bývá protikorozní ochrana, která je tvořena např. ovinutím páskou nebo souvislou vrstvou PVC. Nejčastěji používaný typ má jako další vrstvu pancíř vytvořený ovinutím dvěma ocelovými pásky, který má chránit kabel před mechanickým poškozením. Na něm je vlákninový obal natřený asfaltem.

Ve zvláštních případech se používají kabely poněkud upravené konstrukce, např. kabely namáhané tahem se místo pancíře z pásek používá pancíř z ocelových drátů, protože se nerozplétá. Pro uložení v tvárnících nebo trubkách se používají kabely s holým pláštěm bez pancíře.

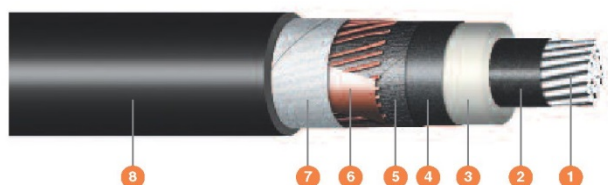
Tyto kabely se u nás pokládaly do 70. let. Dnes se již nevyrábějí, ale vzhledem k tomu, že kabely mají životnost desítky let, budeme se s nimi setkávat v provozu ještě dlouhou dobu. Klasické kabely s papírovou izolací byly nahrazeny novými druhy kabelů, které je možno rozdělit podle druhu výtlačně lisované izolace. Ve srovnání s kabely s napouštěnou papírovou izolací nevzniká při montáži nebo poškození nebezpečí úniku oleje do okolí. Pokládku kabelů s výtlačně lisovanou izolací je možné provádět i v šikmých a svislých trasách. Z hlediska pokládky, montáže souborů a provozu přináší kabely s touto izolací další významné výhody:

- nižší hmotnost kabelu a z toho vyplývající snazší manipulace a přepravu
- pokládka větších délek
- potřeba menšího počtu spojek při pokládce větších délek
- ve srovnání s kabely s napouštěnou papírovou izolací jednodušší montáž kabelových souborů
- během provozu nevyžaduje trasa žádnou údržbu. [10]

Tab. 3 – parametry ANKTOPV - katalog kablo kladno [14]

napětí [kV]	kabel	průřez [mm ²]	C [μF/km]	R [W/km]	X [W/km]	Idov [A]	k [-]	I _c [A/km]
22	ANKTOPV	3 x 240	0,36	0,129	0,088	353	70	4,32

Kabel 22 - AXEKC



Standard

PN 05/96

Konstrukce:

1. Hliníkové jádro
2. Vnitřní polovodivá vrstva
3. Izolace ze zesíťného polyetylenu
4. Vnější polovodivá vrstva
5. Polovodivá páska
6. Stínění měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky
7. Nevodivá páska
8. Vnější PVC plášť

Použití:

Kabely v tomto základním provedení jsou určeny pro pevné uložení na vzduchu, do tvárnic, do trubek z nemagnetického materiálu. Uložení dle ČSN 33 2000-5-52. [14]

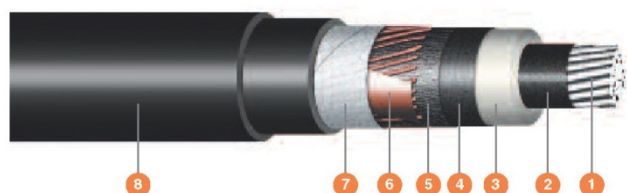
Tab. 4 - Rozměry kabelu [14]

Počet x průřez žil/stínění (mm ²)	Tvar jádra	Průměr jádra (mm)	Jmenovitá tloušťka izolace (mm)	Průměr přes izolaci inf. (mm)	Jmenovitá tloušťka pláště (mm)	Vnější průměr inf. (mm)	Poloměr ohybu (mm)	Hmotnost inf. (kg/km)
1x240/25	RM	18.1	5.5	30.4	2.5	40	600	1705

Tab. 5 - Elektrické parametry [14]

Počet x průřez žil/stínění (mm ²)		Činný odpor při 20°C (Ω/km)	Kapacita (μF/km)	Indukčnost (v trojúhelníku) (mH/km)	Indukčnost na vzduchu (paralelně) (mH/km)	Indukčnost v zemi (paralelně) (mH/km)		
1x240/25		0.125	0.30	0.34	0.50	0.56		
Počet x průřez žil/stínění (mm ²)	Ekvivalentní zkratový proud (kA)	Ekvivalentní zkratový proud stínění (kA)	Časová oteplovací konstanta (v trojúhelníku) (s)	Časová oteplovací konstanta (paralelně) (s)	Proudová zatížitelnost na vzduchu (v trojúhelníku) (A)	Proudová zatížitelnost na vzduchu (paralelně) (A)	Proudová zatížitelnost v zemi (v trojúhelníku) (A)	Proudová zatížitelnost v zemi (paralelně) (A)
1x240/25	22.7	5.0	932	748	496	581	417	455

Kabel 22-AXEKVCEY



Standard

PN 05/96

Konstrukce:

1. Hliníkové jádro
2. Vnitřní polovodivá vrstva
3. Izolace ze zesítného polyetylen
4. Vnější polovodivá vrstva
5. Polovodivá vodoblokující páska
6. Stínění měděnými dráty s protispirálou z měděné pásky
7. Vodoblokující páska
8. Vnější PE + PVC plášť

Použití:

Kabely jsou určeny pro volné uložení ve vzduchu na nosné konstrukce, do země, do tvárnic, do trubek z nemagnetického materiálu. Uložení dle ČSN 33 2000-5-52 v prostředí obyčejném i vlhkém. [14]

Tab. 6 - Rozměry kabelu [14]

Počet x průřez žil/stínění (mm ²)	Tvar jádra	Průměr jádra (mm)	Jmenovitá tloušťka izolace (mm)	Průměr přes izolaci inf. (mm)	Jmenovitá tloušťka (mm)	Vnější průměr inf. (mm)	Poloměr ohybu (mm)	Hmotnost inf. (kg/km)
1x240/25	RM	18.1	5.5	30.4	2.5/1.5	43	645	1998

Tab. 7 - Elektrické parametry [14]

Počet x průřez žil/stínění (mm ²)		Činný odpor při 20°C (Ω/km)		Kapacita (μF/km)	Indukčnost (v trojúhelníku) (mH/km)		Indukčnost na vzduchu (paralelně) (mH/km)		Indukčnost v zemi (paralelně) (mH/km)	
1x240/25		0.125		0.30	0.36		0.52		0.57	
Počet x průřez žil/stínění (mm ²)	Ekvivalentní zkratový proud (kA)	Ekvivalentní zkratový proud stínění (kA)	Časová otevlovací konstanta (v trojúhelníku) (s)	Časová otevlovací konstanta (paralelně) (s)	Proudová zatížitelnost na vzduchu (v trojúhelníku) (A)	Proudová zatížitel- nost na vzduchu (paralelně) (A)	Proudová zatížitelnost v zemi (v trojúhelníku) (A)	Proudová zatížitelnost v zemi (paralelně) (A)		
1x240/25	22.7	5.0	924	760	496	581	417	455		

6.1.3 Použité podpěrné body, konzoly, izolátory

Podpěrné body venkovních vedení vn

Jako podpěrné body venkovních vedení VN jsou používány betonové sloupy, příhradové stožáry, dřevěné sloupy a ocelové plechové sloupy, postavené za účelem umístění vodičů. Za podpěrné body venkovního vedení lze také považovat konstrukce stožárových trafostanic, objekty zděných trafostanic a rozveden, portály rozveden VVN/VN a budovy připojených objektů.

Podle druhu použití vedení musí být podpěrné body dimenzovány na zatížení, které na ně působí. Kromě výjimečných případů (zcela nepřístupná nebo zneprístupněná místa, oplocené prostory rozveden) není dovoleno používat trvalé kotvení podpěrných bodů. Kotvy lze použít pouze pro dočasná kotvení v průběhu stavby venkovního vedení.

Betonové sloupy

Betonové sloupy jsou základním a nejčastěji používaným typem podpěrného bodu. Používají se pro jednoduchá a dvojitá vedení všech průřezů a druhů vodičů. Podpěrné body mohou být z jednoho sloupu nebo zdvojené, složené ze dvou betonových sloupů s dvojnásobným dovoleným vrcholovým namáháním. Podle použití ve vedení se rozlišují na nosné, rohové, odbočné i koncové, a jsou podle toho také dimenzovány. Sloupy musí být opatřeny betonovým základem, navrženým podle typu betonového sloupu a únosnosti základové zeminy. Dovoleno jsou betonové základy prstencové a válcové do vrtaných základových jam, deskové a hranolové do kopaných základových jam. Vrcholy sloupů musí být chráněny proti zatékání vody plastovými čepičkami. Na sloupy jsou montovány konzoly pro upevnění vodičů, příp. další zařízení, např. spínače.

Příhradové stožáry

Příhradové stožáry vyrobené podle příslušné normy jsou, vzhledem ke své konstrukci, určeny pro dvojnásobná a vícenásobná vedení holých a jednoduchých izolovaných vodičů. V jednoduchých vedeních se použijí v případě nutnosti umístění vyššího podpěrného bodu, nebo při vyšších vrcholových silách vodičů jako stožáry rohové, odbočné, křížovatkové, výztužné a koncové. Příhradový stožár vyrábějí výrobci podle zadané specifikace. Betonové základy se u příhradových stožárů budují monolitické blokové, v závislosti na typu příhradového sloupu a únosnosti základové zeminy. Součástí stožáru jsou konzoly pro upevnění vodičů, v typech podle normy a schváleného standardu materiálu. Na stožáry lze dále montovat další konstrukce - špičky zemního lana, pomocné konstrukce pro kabelové svody, konstrukce pro spínače apod. Všechny ocelové konstrukce by měly být chráněny před účinky koroze žárovým pozinkováním. [10]

Konzoly venkovních vedení vn

Konzoly pro venkovní vedení s holými a jednoduchými izolovanými vodiči VN na betonových, dřevěných a ocelových plechových sloupech musí odpovídat schválenému Standardu materiálu. Volba konfigurace vodičů a typu konzol je závislá na typu použitého vodiče.

Jednoduché vedení:

rovinné uspořádání se třemi vodiči vedle sebe, vyložení krajního vodiče od osy vedení je cca 1,5m,

Izolátory

Izolátory a izolátorové závěsy musí splňovat současně dvě základní funkce - mechanicky upevňují vodiče na konstrukci vedení a elektricky oddělují vodiče pod napětím od části vedení, kde napětí být nesmí (konzoly). Zásadním požadavkem na izolátory VN, podpěrné i závěsné je, že musí být neprůrazné.

Podpěrné izolátory

Podpěrné izolátory se používají pro holé i jednoduché izolované vodiče na podpěrných bodech nosných (v přímé trase) a rohových, do max. dovolené pevnosti izolátoru. Dále se použijí na vytvoření bezpečnostního závěsu holých vodičů a na připevnění různých šablon a propojení vodičů na stožárech.

Závěsné izolátory

Závěsné izolátory jsou určeny pro jednoduché nebo dvojité nosné a kotevní závěsy, holých a izolovaných vodičů. Keramické závěsné izolátory jsou pro svoji větší hmotnost vhodné především pro nosné řetězce.

Plastové závěsné izolátory mají dřík ze skelného vlákna navinutého mnoha závity do smyčky tvaru „∞“ a používají se především pro kotevní závěsy. [10]

6.1.4 Výpočet zemních kapacit venkovního vedení

Délky a typy vodičů jednotlivých úseků:

Viz. Příloha č. 1.

Tab. 8 – Délky a typy vodičů jednotlivých úseků

Úsek vedení	Délka kabelového vedení	Délka venkovního vedení
D45	AXEKCY 240/285 ANKTOPV 240/315m	AlFe 185/4200m
D46	AXEKCY 240/285 ANKTOPV 240/315m	AlFe 185/4200m
D45A	AXEKVCEY 240/150m	
D46A	AXEKVCEY 240/615m	AlFe 185/270m
D46B	AXEKVCEY 240/120m	AlFe 185/80m
D77	ANKTOPV 240/710m	AlFe 150/2850m
D77/1		AlFe 120/1000m
D78	ANKTOPV 240/710m	AlFe 150/2850m
D78A	AXEKVCEY 240/320m	AlFe 185/70m
D79	AXEKVCEY 240/250m AXEKCY 240/150m	AlFe 150/2750m
D82	ANKTOPV 240/350m AXEKVCEY 240/520m	AlFe 185/3400m
D83	ANKTOPV 240/350m AXEKVCEY 240/520m	AlFe 185/3400m
D86	ANKTOPV 240/560m AXEKVCEY 240/200m	AlFe 185/2800m
D87	ANKTOPV 240/560m AXEKVCEY 240/200m	AlFe 185/2800m

Kapacitu kabelového vedení určíme výpočtem a to tak, že délku daného úseku násobíme hodnotou kapacity na kilometr, kterou jsme vyčetli v katalogu výrobce (viz. Kapitola silové kabely).

Tab. 9 – Kapacita kabelového vedení

Úsek vedení	Použitý kabel	Délka kabelového vedení (m)	Kapacita úseku (μF)
D45	AXEKCY 240 ANKTOPV 240	285+315	0,0855+0,1134=0,1989
D46	AXEKCY 240 ANKTOPV 240	285+315	0,0855+0,1134=0,1989
D45A	AXEKVCEY 240	150	0,045
D46A	AXEKVCEY 240	615	0,1845
D46B	AXEKVCEY 240	120	0,036
D77	ANKTOPV 240	710	0,2556
D78	ANKTOPV 240	710	0,2556
D78A	AXEKVCEY 240	320	0,096
D79	AXEKVCEY 240 AXEKCY 240	250+150	0,075+0,045=0,12
D82	ANKTOPV 240 AXEKVCEY 240	350+520	0,126+0,156=0,282
D83	ANKTOPV 240 AXEKVCEY 240	350+520	0,126+0,156=0,282
D86	ANKTOPV 240 AXEKVCEY 240	560+200	0,2016+0,126=0,2616
D87	ANKTOPV 240 AXEKVCEY 240	560+200	0,2016+0,126=0,2616
Celkem		7485	2,477

Celková kapacita kabelového vedení:

$$C_{0-kab} = 2,4777 \mu F$$

Celkový kapacitní proud kabelového vedení:

Poruchový proud pro dokonalé zemní spojení je také někdy značen jako I_{kap} .

$$I_{kap} = 3\omega C_0 U_f, \quad (37.)$$

$$I_{kap-kab} = 3\omega C_{0-kab} U_f = 3 \cdot 2\pi f \cdot 2,4777 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 29,661 \text{ A}$$

6.1.5 Výpočet zemních kapacit venkovního vedení

Pro určení poruchového proudu I_p vedení nejprve odvodím výpočet dílčích kapacit. Všechny parametry budu určovat na vzdálenost 1km vodiče, proto zde nebudu uvažovat délku vodiče. Odvozené vztahy poté aplikuji na výpočet kapacit vodičů venkovního vedení.

Při výpočtu budu vycházet ze soustavy maticových rovnic

$$U = \delta Q \text{ a } Q = kU \quad (38.)$$

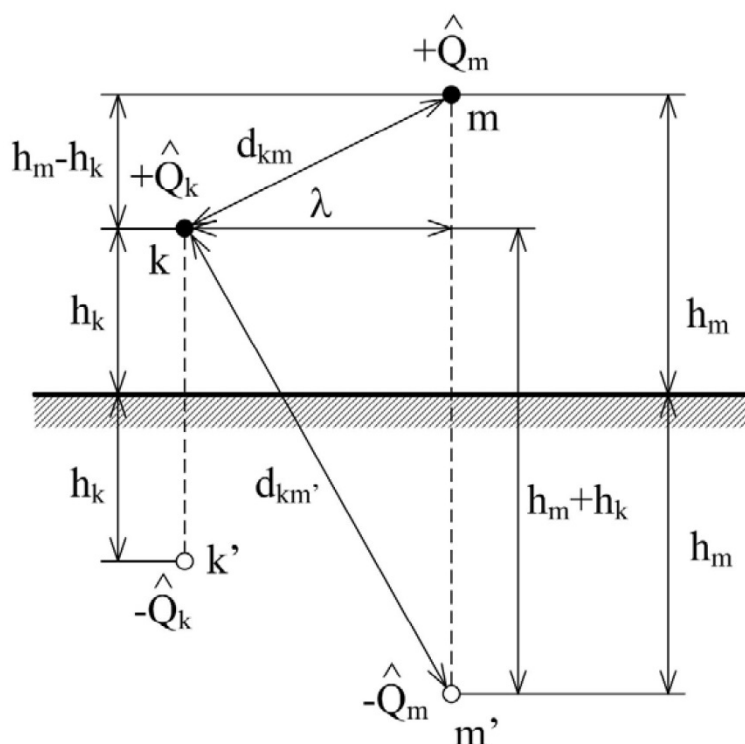
Kde: U – potenciál vodiče,

Q – lineární hustota náboje,

δ – potenciálový součinitel,

k – kapacitní součinitel, $k = \delta^{-1}$.

Pro výpočet zemních kapacit vedení použiji metodu zrcadlení, kdy symetricky podle roviny země ke každému skutečnému vodiči (k) s lineární hustotou náboje Q_k přiřadím vodič fiktivní (k') stejných rozměrů s lineární hustotou $Q_{k'} = -Q_k$, jak je znázorněno na obrázku (36).



Obr. 36 – Dvě dvojice skutečných a fiktivních vodičů [10]

Pro potenciál v libovolném bodě na povrchu vodiče m bude platit vztah (39).

$$U_m = \sum_{k,k'=1}^n (U_{mk} + U_{mk'}) = \sum_{k,k'=1}^n \frac{Q_k}{2\pi\epsilon} \ln \frac{d_{mk'}}{d_{mk}} = \sum_{k=1}^n \delta_{km} Q_k \quad (39.)$$

Kde: $U_{mk}(U_{mk'})$ – příspěvek vodiče k (k') na potenciál v bodě na povrchu vodiče m ,

ϵ – permitivita materiálu, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$

ϵ_0 – permitivita vakua, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$

ϵ_r – relativní permitivita vodiče, izolace a prostředí

(pro neizolovaný vodič ve vzduchu $\epsilon_r = 1$).

Pro vzdálenost vodiče sama od sebe platí, že $d_{kk} = r_k$, kde r_k je poloměr vodiče, a vzdálenost mezi skutečnými vodiči k a m je $d_{km} = d_{mk}$

Z obrázku (36) dále vyplývá, že vzdálenost skutečného a fiktivního vodiče $d_{kk'} = 2h_k$, a lze také určit vzdálenost skutečného vodiče od neodpovídajícího fiktivního vodiče

$$d_{km'} = d_{m'k} = d_{mk'} = d_{k'm} = \sqrt{(h_k + h_m)^2 + [d_{km}^2 - (h_k - h_m)^2]} = \sqrt{4h_k \cdot h_m + d_{km}^2} \quad (40.)$$

Ze vztahu (39) si vyjádříme potenciálový součinitel δ . Za d_{mk} a $d_{mk'}$ dosadíme vzdálenosti formulované v (40) a přirozené logaritmy převedu na dekadické.

$$\delta_{mk} = \delta_{km} = \frac{1}{0,0242 \cdot \varepsilon_r} \log \frac{\sqrt{4h_k \cdot h_m + d_{km}^2}}{d_{mk}} \quad (41.)$$

$$\delta_{mm} = \frac{1}{0,0242 \cdot \varepsilon_r} \log \frac{2h_m}{r_m} \quad (42.)$$

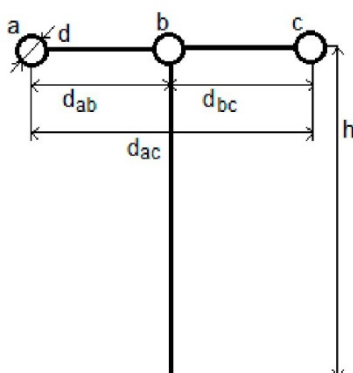
Z potenciálových součinitelů sestavím matici $|\delta| = \begin{bmatrix} \delta_{kk} & \delta_{km} \\ \delta_{mk} & \delta_{mm} \end{bmatrix}$ a její inverzí získám matici kapacitních součinitelů $|k| = |\delta|^{-1}$. Součtem kapacitních součinitelů příslušných k danému vodiči vypočtu dílčí kapacitu vodiče c_{m0} a c_{mk} .

$$c_{m0} = k_{mm} + \sum_{k=1, k \neq m}^n k_{mk} \quad c_{mk} = c_{km} = -k_{mk} \quad (43.)$$

Z dílčích kapacit mohu určit provozní kapacitu jednotlivých fází

$$\bar{C}_m = \frac{c_{m0} \bar{U}_m + \sum_{m=1}^n c_{mk} (\bar{U}_m - \bar{U}_k)}{\bar{U}_m} = \frac{\bar{Q}_m}{\bar{U}_m} \quad (44.)$$

Výše uvedené vztahy použiji pro určení kapacity jednoduchého trojfázového venkovního vedení. Příklad výpočtu provedu pro rovinné uspořádání vodičů, které je znázorněné na obrázku (37). Výpočty budu provádět na hladině 22 kV pro lana AlFe 6 se jmenovitým průřezem 185, 150, 120 mm². [10]



Obr. 37 Rovinné uspořádání [10]

Výpočet zemních kapacit pro rovinné uspořádání

Jmenovitý průřez:

$S = 185 \text{ mm}^2$ / průměr vodiče: $d = 19,2 \text{ mm}$ ($r = 9,6 \text{ mm}$)

$S = 150 \text{ mm}^2$ / průměr vodiče: $d = 17,25 \text{ mm}$ ($r = 8,625 \text{ mm}$)

$S = 120 \text{ mm}^2$ / průměr vodiče: $d = 15,65 \text{ mm}$ ($r = 7,825 \text{ mm}$)

Vzdálenosti vodičů:

$d_{ab} = 1,5 \text{ m}$

$d_{bc} = 1,5 \text{ m}$

$d_{ac} = 3 \text{ m}$

Výška vodičů nad zemí: $h = 10, 12, 16, 18 \text{ m}$

Tab. 10 – Délky jednotlivých úseků venkovního vedení a výška + typy stožárů

Úsek vedení	Použité vedení	Délka venkovního vedení	Typy, počet a výšky stožárů
D45	AlFe 185	4200m	Příhradové stožáry, 27 st. portál, výška 18m
D46	AlFe 185	4200m	
D46A	AlFe 185	270m	Betonové 2 st. portál, výška 10m
D46B	AlFe 185	80m	Příhradový stožár portál, výška 10m
D77	AlFe 150	2850m	Příhradové stožáry, 20 st. portál, výška 16m
D78	AlFe 150	2850m	
D77/1	AlFe 120	1000m	Betonové st.8ks. portál, výška 10m
D78A	AlFe 185	70m	Betonové st.1ks. portál, výška 10m
D79	AlFe 150	2750m	Příhradové stožáry, 24 st. portál, výška 12m
D82	AlFe 185	3400m	Příhradové stožáry, 20 st. portál, výška 18m
D83	AlFe 185	3400m	
D86	AlFe 185	2800m	Příhradové stožáry, 17 st. portál, výška 18m
D87	AlFe 185	2800m	

Výpočet potenciálových součinitelů podle vztahů (41) a (42):

Výpočet pro výšku 18m a průřez 185mm²

$$\delta_{ab} = \delta_{ba} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_b + d_{ab}^2}}{d_{ab}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 18 \cdot 18 + 1,5^2}}{1,5} = 57,05 \text{ [km/}\mu\text{F]}$$

$$\delta_{ac} = \delta_{ca} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_c + d_{ac}^2}}{d_{ac}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 18 \cdot 18 + 3^2}}{3} = 44,66 \text{ [km/}\mu\text{F]}$$

$$\delta_{bc} = \delta_{cb} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_b \cdot h_c + d_{bc}^2}}{d_{bc}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 18 \cdot 18 + 1,5^2}}{1,5} = 57,05 \text{ [km/}\mu\text{F]}$$

$$\delta_{aa} = \delta_{bb} = \delta_{cc} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2h}{r} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2 \cdot 18}{0,0096} = 147,69 \text{ [km/}\mu\text{F]}$$

Vyjádření matice potenciálových součinitelů δ a kapacitních součinitelů k :

$$|\delta| = \begin{bmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} \\ \delta_{ba} & \delta_{bb} & \delta_{bc} \\ \delta_{ca} & \delta_{cb} & \delta_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 147,69 & 57,05 & 44,66 \\ 57,05 & 147,69 & 57,05 \\ 44,66 & 57,05 & 147,69 \end{bmatrix} \text{ [km/}\mu\text{F]}$$

$$|k| = |\delta^{-1}| = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ba} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ca} & k_{cb} & k_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,225 & -2,605 & -1,481 \\ -2,605 & 8,784 & -2,605 \\ -1,481 & -2,605 & 8,225 \end{bmatrix} \text{ [nF/km]}$$

$$c_{ab} = c_{ba} = -k_{ab} = 2,605 \text{ [nF/km]}$$

$$c_{ac} = c_{ca} = -k_{ac} = 1,481 \text{ [nF/km]}$$

$$c_{bc} = c_{cb} = -k_{bc} = 2,605 \text{ [nF/km]}$$

$$c_{a0} = k_{aa} + k_{ab} + k_{ac} = 8,225 - 2,605 - 1,481 = 4,139 \text{ [nF/km]}$$

$$c_{b0} = k_{ba} + k_{bb} + k_{bc} = 8,784 - 2,605 - 2,605 = 3,574 \text{ [nF/km]}$$

$$c_{c0} = k_{ca} + k_{cb} + k_{cc} = 8,225 - 2,605 - 1,481 = 4,139 \text{ [nF/km]}$$

Ze zemních kapacit jednotlivých fází vypočtu jejich střední hodnotu.

$$C_0 = \frac{c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}}{3} = \frac{4,139 + 3,574 + 4,139}{3} = 3,951 \text{ [nF/km]}$$

Dle vztahu (37) mohu vypočítat velikost kapacitních proudů

$$I_{\text{kap}} = 3\omega C_0 U_f = 3 \cdot 2\pi f \cdot 3,951 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 0,0473 \text{ A/km} = 47,3 \text{ mA/km}$$

Normou udávaný kapacitní proud pro venkovní vedení 22kV je maximálně 63mA, což řešené vedení splňuje.

Výpočet pro výšku 10m a průřez 185mm²

$$\delta_{ab} = \delta_{ba} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_b + d_{ab}^2}}{d_{ab}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 1,5^2}}{1,5} = 46,54 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{ac} = \delta_{ca} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_c + d_{ac}^2}}{d_{ac}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 3^2}}{3} = 34,25 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{bc} = \delta_{cb} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_b \cdot h_c + d_{bc}^2}}{d_{bc}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 1,5^2}}{1,5} = 46,54 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{aa} = \delta_{bb} = \delta_{cc} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2h}{r} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2 \cdot 10}{0,0096} = 137,14 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

Vyjádření matice potenciálových součinitelů δ a kapacitních součinitelů k :

$$|\delta| = \begin{bmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} \\ \delta_{ba} & \delta_{bb} & \delta_{bc} \\ \delta_{ca} & \delta_{cb} & \delta_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 137,14 & 46,54 & 34,25 \\ 46,54 & 137,14 & 46,54 \\ 34,25 & 46,54 & 137,14 \end{bmatrix} \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$|k| = |\delta^{-1}| = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ba} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ca} & k_{cb} & k_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,436 & -2,427 & -1,283 \\ -2,427 & 8,939 & -2,427 \\ -1,283 & -2,427 & 8,436 \end{bmatrix} \text{ [nF / km]}$$

$$c_{ab} = c_{ba} = -k_{ab} = 2,427 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{ac} = c_{ca} = -k_{ac} = 1,283 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{bc} = c_{cb} = -k_{bc} = 2,427 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{a0} = k_{aa} + k_{ab} + k_{ac} = 8,436 - 2,427 - 1,283 = 4,726 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{b0} = k_{ba} + k_{bb} + k_{bc} = 8,939 - 2,427 - 2,427 = 4,085 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{c0} = k_{ca} + k_{cb} + k_{cc} = 8,436 - 2,427 - 1,283 = 4,726 \text{ [nF / km]}$$

Ze zemních kapacit jednotlivých fází vypočtu jejich střední hodnotu.

$$C_0 = \frac{c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}}{3} = \frac{4,726 + 4,085 + 4,726}{3} = 4,51 \text{ [nF / km]}$$

Dle vztahu (37) mohu vypočítat velikost kapacitních proudů

$$I_{\text{kap}} = 3\omega C_0 U_f = 3 \cdot 2\pi f \cdot 4,51 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 0,054 \text{ A/km} = 54 \text{ mA/km}$$

Normou udávaný kapacitní proud pro venkovní vedení 22kV je maximálně 63mA, což řešené vedení splňuje.

Výpočet pro výšku 12m a průřez 150mm²

$$\delta_{ab} = \delta_{ba} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_b + d_{ab}^2}}{d_{ab}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 12 \cdot 12 + 1,5^2}}{1,5} = 49,8 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{ac} = \delta_{ca} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_c + d_{ac}^2}}{d_{ac}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 12 \cdot 12 + 3^2}}{3} = 37,46 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{bc} = \delta_{cb} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_b \cdot h_c + d_{bc}^2}}{d_{bc}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 12 \cdot 12 + 1,5^2}}{1,5} = 49,8 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{aa} = \delta_{bb} = \delta_{cc} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2h}{r} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2 \cdot 12}{0,008625} = 142,33 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

Vyjádření matice potenciálových součinitelů δ a kapacitních součinitelů k :

$$|\delta| = \begin{bmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} \\ \delta_{ba} & \delta_{bb} & \delta_{bc} \\ \delta_{ca} & \delta_{cb} & \delta_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 142,33 & 49,8 & 37,46 \\ 49,8 & 142,33 & 49,8 \\ 37,46 & 49,8 & 142,33 \end{bmatrix} \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$|k| = |\delta^{-1}| = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ba} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ca} & k_{cb} & k_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,218 & -2,414 & -1,32 \\ -2,414 & 8,72 & -2,414 \\ -1,32 & -2,414 & 8,218 \end{bmatrix} \text{ [nF / km]}$$

$$c_{ab} = c_{ba} = -k_{ab} = 2,141 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{ac} = c_{ca} = -k_{ac} = 1,32 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{bc} = c_{cb} = -k_{bc} = 2,141 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{a0} = k_{aa} + k_{ab} + k_{ac} = 8,218 - 2,141 - 1,32 = 4,757 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{b0} = k_{ba} + k_{bb} + k_{bc} = 8,72 - 2,141 - 2,141 = 3,936 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{c0} = k_{ca} + k_{cb} + k_{cc} = 8,218 - 2,141 - 1,32 = 4,757 \text{ [nF / km]}$$

Ze zemních kapacit jednotlivých fází vypočtu jejich střední hodnotu.

$$C_0 = \frac{c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}}{3} = \frac{4,757 + 3,936 + 4,757}{3} = 4,483 \text{ [nF / km]}$$

Dle vztahu (37) mohu vypočítat velikost kapacitních proudů

$$I_{\text{kap}} = 3\omega C_0 U_f = 3 \cdot 2\pi f \cdot 4,483 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 0,0537 \text{ A/km} = 53,7 \text{ mA/km}$$

Normou udávaný kapacitní proud pro venkovní vedení 22kV je maximálně 63mA, což řešené vedení splňuje.

Výpočet pro výšku 16m a průřez 150mm²

$$\delta_{ab} = \delta_{ba} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_b + d_{ab}^2}}{d_{ab}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 16 \cdot 16 + 1,5^2}}{1,5} = 54,94 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{ac} = \delta_{ca} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_c + d_{ac}^2}}{d_{ac}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 16 \cdot 16 + 3^2}}{3} = 42,56 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{bc} = \delta_{cb} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_b \cdot h_c + d_{bc}^2}}{d_{bc}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 16 \cdot 16 + 1,5^2}}{1,5} = 54,94 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{aa} = \delta_{bb} = \delta_{cc} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2h}{r} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2 \cdot 16}{0,008625} = 147,5 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

Vyjádření matice potenciálových součinitelů δ a kapacitních součinitelů k :

$$|\delta| = \begin{bmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} \\ \delta_{ba} & \delta_{bb} & \delta_{bc} \\ \delta_{ca} & \delta_{cb} & \delta_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 147,5 & 54,94 & 42,56 \\ 54,94 & 147,5 & 54,94 \\ 42,56 & 54,94 & 147,5 \end{bmatrix} \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$|k| = |\delta^{-1}| = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ba} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ca} & k_{cb} & k_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,12 & -2,5 & -1,41 \\ -2,5 & 8,64 & -2,5 \\ -1,41 & -2,5 & 8,12 \end{bmatrix} \text{ [nF / km]}$$

$$c_{ab} = c_{ba} = -k_{ab} = 2,5 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{ac} = c_{ca} = -k_{ac} = 1,41 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{bc} = c_{cb} = -k_{bc} = 2,5 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{a0} = k_{aa} + k_{ab} + k_{ac} = 8,107 - 2,5 - 1,41 = 4,197 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{b0} = k_{ba} + k_{bb} + k_{bc} = 9,233 - 2,5 - 2,5 = 3,107 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{c0} = k_{ca} + k_{cb} + k_{cc} = 8,107 - 2,5 - 1,41 = 4,197 \text{ [nF / km]}$$

Ze zemních kapacit jednotlivých fází vypočtu jejich střední hodnotu.

$$C_0 = \frac{c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}}{3} = \frac{4,197 + 3,107 + 4,197}{3} = 3,83 \text{ [nF / km]}$$

Dle vztahu (37) mohu vypočítat velikost kapacitních proudů

$$I_{\text{kap}} = 3\omega C_0 U_f = 3 \cdot 2\pi f \cdot 3,83 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 0,046 \text{ A/km} = 46 \text{ mA/km}$$

Normou udávaný kapacitní proud pro venkovní vedení 22kV je maximálně 63mA, což řešené vedení splňuje.

Výpočet pro výšku 10m a průřez 120mm²

$$\delta_{ab} = \delta_{ba} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_b + d_{ab}^2}}{d_{ab}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 1,5^2}}{1,5} = 46,54 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{ac} = \delta_{ca} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_a \cdot h_c + d_{ac}^2}}{d_{ac}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 3^2}}{3} = 34,25 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{bc} = \delta_{cb} = \frac{1}{0,0242} \cdot \frac{\sqrt{4 \cdot h_b \cdot h_c + d_{bc}^2}}{d_{bc}} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{\sqrt{4 \cdot 10 \cdot 10 + 1,5^2}}{1,5} = 46,54 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$\delta_{aa} = \delta_{bb} = \delta_{cc} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2h}{r} = \frac{1}{0,0242} \cdot \log \frac{2 \cdot 10}{0,007825} = 140,8 \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

Vyjádření matice potenciálových součinitelů δ a kapacitních součinitelů k :

$$|\delta| = \begin{bmatrix} \delta_{aa} & \delta_{ab} & \delta_{ac} \\ \delta_{ba} & \delta_{bb} & \delta_{bc} \\ \delta_{ca} & \delta_{cb} & \delta_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 140,8 & 46,54 & 34,25 \\ 46,54 & 140,8 & 46,54 \\ 34,25 & 46,54 & 140,8 \end{bmatrix} \text{ [km / } \mu\text{F]}$$

$$|k| = |\delta^{-1}| = \begin{bmatrix} k_{aa} & k_{ab} & k_{ac} \\ k_{ba} & k_{bb} & k_{bc} \\ k_{ca} & k_{cb} & k_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,16 & -2,3 & -1,23 \\ -2,3 & 8,62 & -2,3 \\ -1,23 & -2,3 & 8,16 \end{bmatrix} \text{ [nF / km]}$$

$$c_{ab} = c_{ba} = -k_{ab} = 2,3 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{ac} = c_{ca} = -k_{ac} = 1,23 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{bc} = c_{cb} = -k_{bc} = 2,3 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{a0} = k_{aa} + k_{ab} + k_{ac} = 8,16 - 2,3 - 1,23 = 4,63 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{b0} = k_{ba} + k_{bb} + k_{bc} = 8,62 - 2,3 - 2,3 = 4,02 \text{ [nF / km]}$$

$$c_{c0} = k_{ca} + k_{cb} + k_{cc} = 8,16 - 2,3 - 1,23 = 4,63 \text{ [nF / km]}$$

Ze zemních kapacit jednotlivých fází vypočtu jejich střední hodnotu.

$$C_0 = \frac{c_{a0} + c_{b0} + c_{c0}}{3} = \frac{4,63 + 4,02 + 4,63}{3} = 4,427 \text{ [nF / km]}$$

Dle vztahu (37) mohu vypočítat velikost kapacitních proudů

$$I_{kap} = 3\omega C_0 U_f = 3 \cdot 2\pi f \cdot 4,427 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = 0,053 \text{ A/km} = 53 \text{ mA/km}$$

Normou udávaný kapacitní proud pro venkovní vedení 22kV je maximálně 63mA, což řešené vedení splňuje.

Tab. 11 – Vypočtené kapacity jednotlivých úseků venkovního vedení

Úsek vedení	Použité vedení	Délka venkovního vedení (m)	C ₀ Kapacita vedení na km (nF/km)	Kapacita úseku (μF)
D45	AlFe 185	4200m	3,951	0,0166
D46	AlFe 185	4200m	3,951	0,0166
D46A	AlFe 185	270m	4,51	0,0012
D46B	AlFe 185	80m	4,51	0,00036
D77	AlFe 150	2850m	3,83	0,011
D78	AlFe 150	2850m	3,83	0,011
D77/1	AlFe 120	1000m	4,427	0,00443
D78A	AlFe 185	70m	4,51	0,00032
D79	AlFe 150	2750m	4,483	0,0123
D82	AlFe 185	3400m	3,951	0,01344
D83	AlFe 185	3400m	3,951	0,01344
D86	AlFe 185	2800m	3,951	0,011
D87	AlFe 185	2800m	3,951	0,011
Celkem				0,123

Celková kapacita venkovního vedení:

$$C_{0\text{-venk}} = \underline{0,123\mu\text{F}}$$

Celkový kapacitní proud venkovního vedení dle vztahu (37):

$$I_{\text{kap-venk}} = 3\omega C_{0\text{-venk}} U_f = 3 \cdot 2\pi f \cdot 0,123 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} = \underline{1,47 \text{ A}}$$

Výpočet dle normy ČSN 33 3070

Pro srovnání a ověření správnosti vypočtených hodnot venkovního vedení, jsem zařadil výpočet kapacitního proudu a kapacity venkovního vedení dle hodnot udávaných normou ČSN 33 3070. Norma udává pro vedení 22kV hodnotu max. kapacitního proudu 63mA/km.

$$\text{AlFe 185} - 21220\text{m} = 1336,86 \text{ mA}$$

$$\text{AlFe 150} - 8450\text{m} = 532,35 \text{ mA}$$

$$\text{AlFe 120} - 1000\text{m} = 63 \text{ mA}$$

Celkový kapacitní proud a kapacita venkovního vedení dle normy

$$I_{\text{kap-norm}} = 1932,21 \text{ mA} = 1,93221 \text{ A} \Rightarrow C_{0\text{-norm}} = \underline{0,15755\mu\text{F}}$$

Vypočtená hodnota kapacitního proudu venkovního vedení je o něco menší, než hodnota, která by odpovídala normě. Tento nepatrný rozdíl může být způsoben nepřesnostmi ve výpočtu, např. nebyl brán v potaz vliv izolátorů, vliv proměnlivé výšky způsobený zvlněním terénu, či průvěsem. Nicméně vedení odpovídá normě.

Celková kapacita a kapacitní proud celého vedení:

$$I_{\text{kap-celk}} = 29,661 + 1,47 = \underline{31,13 \text{ A}}$$

$$C_{0\text{-celk}} = \underline{2,6 \mu\text{F}}$$

Indukčnost zhášecí tlumivky:

$$L = \frac{1}{3 \cdot \omega^2 \cdot C_0} = \frac{1}{3 \cdot (2\pi f)^2 \cdot 2,6 \cdot 10^{-6}} = \underline{1,3 \text{ [H]}} \quad (45.)$$

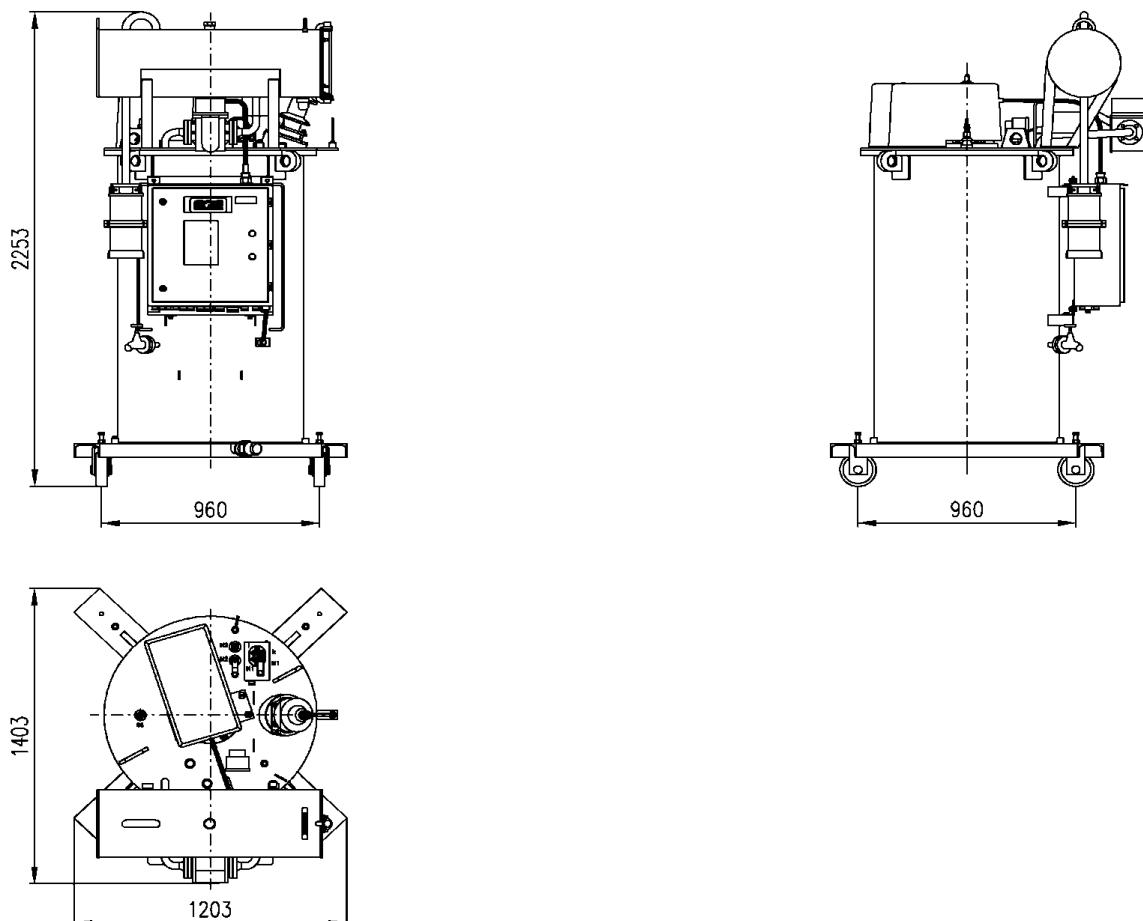
Výkon zhášecí tlumivky:

$$Q_L = \frac{U_S^2}{3 \cdot \omega \cdot L} = \frac{22000^2}{3 \cdot (2\pi 50) \cdot 1,3} = 395030 \text{ Var} = \underline{395 \text{ [kvar]}} \quad (46.)$$

Minimálně tímto výkonem by měla tlumivka disponovat. Pokud bych ještě přičetl třetinovou rezervu pro případný rozvoj sítě bude tento výkon:

$$Q_{L\text{rez}} = Q_L + \frac{1}{3} \cdot Q_L = 395030 + \frac{1}{3} \cdot 395030 = 526706 \text{ var} = \underline{\underline{527 \text{ [kvar]}}} \quad (47.)$$

Z vypočtených hodnot se nabízí jako vhodná alternativa zhášecí tlumivka firmy EGE, typové označení ASR 0.63, která má v nepřetržitém provozu maximální výkon 630kVA.



Obr. 38 – Schéma zhášecí tlumivky ARS 0.63 [11]



Obr. 39 - Foto zhášecí tlumivky ARS 0.63 [11]

Tab. 12 – Parametry zhášecí tlumivky ARS 0.63 [11]

Petersenová cívka-nepřetržitý provoz (standardní provedení)					
Výkon (max) kVA	Typ	typické rozměry (informativní)			Váha (max) kg
		A (výška)	B (šířka)	C (délka)	
630	ARS 0.63	2220	2160	1220	1900

Petersenová cívka-krátká doba provozu- 2 hodiny (standardní provedení)					
Výkon (max) kVA	Typ	typické rozměry (informativní)			Váha (max) kg
		A (výška)	B (šířka)	C (délka)	
700	ARS 0.63	2220	1340	1220	20000

6.2 Výběr automatiky ladění zhášecí tlumivky

6.2.1 Automatika ladění zhášecích tlumivek ARL 4 v 2.0

Automatika ladění je kombinovaná automatika pro ladění zhášecích tlumivek a automatické přepínání odporů.



Obr. 40 – Automatika ladění zhášecích tlumivek ARL 4 V2.0 [15]

Základní charakteristika:

Automatika ladění zhášecích tlumivek (ZT) je určena pro automatickou regulaci pohyblivé části zhášecí tlumivky zapojené v uzlu distribučního transformátoru v kompenzovaných VN sítích (nastavení indukčnosti L). Proměnná indukčnost zhášecí tlumivky (ZT) tvoří s kapacitou VN sítě paralelní rezonanční obvod, v jehož vyladěném stavu (maximum napětí U_0 uzlu transformátoru) je celkový kapacitní proud I_C kompenzován právě nastaveným proudem tlumivky I_L . Ve vyladěném stavu v případě jednofázové zemní poruchy protéká místem poruchy pouze minimální činný proud.

Automatika přepínání odporů zajišťuje přepnutí výkonového odporu paralelně ke zhášecí tlumivce v uzlu distribučního transformátoru (k výkonovému vinutí zhášecí tlumivky) v případě jednofázové zemní poruchy v kompenzovaných VN sítích pro přechodné zvýšení činné složky poruchového proudu a tím zlepšení podmínek pro činnost elektronických ochrany a indikátorů, podle nichž se identifikuje místo zemní poruchy.

Technické specifikace

Automatika ARL je programovatelné mikropočítačové zařízení, jehož HW a SW zajišťuje požadované vlastnosti, základní funkční vlastnosti a technické parametry:

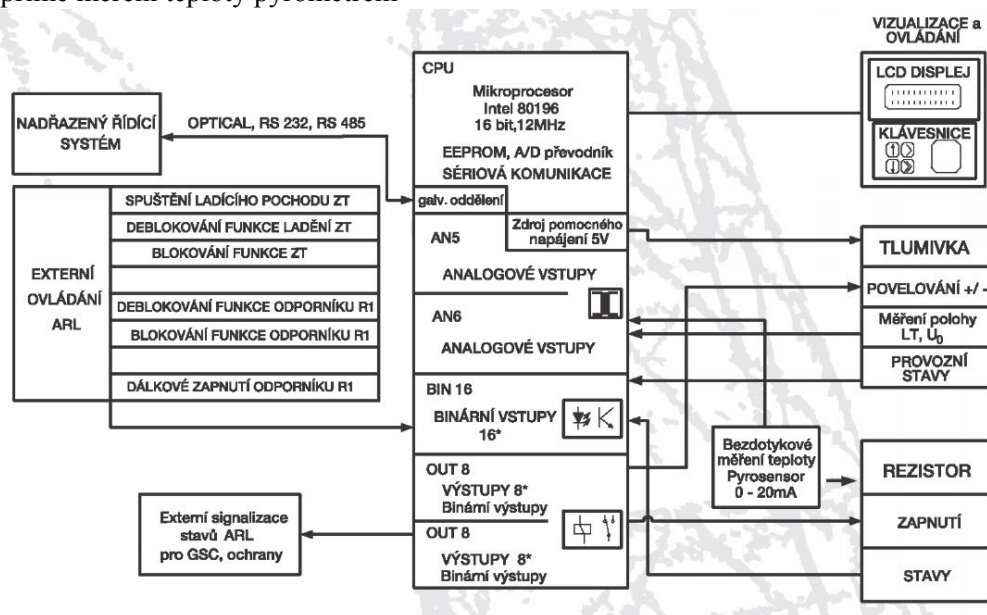
Automatika ladění zhášecích tlumivek (AL):

- automatický start ladicího pochodu s vysokou citlivostí změny U_0 pouze v případě změny konfigurace VN sítě
- vysoká odolnost proti případným nadbytečným startům ladicího pochodu při změnách provozních stavů, poruchách a změnách napětí U_0 , které splňují podmínky pro start, ale nejsou v přímé souvislosti se změnou konfigurace VN sítě (kývání U_0 , harmonické signály, příspěvky vzdálených poruch atd.)
- automatická kompenzace samovolných změn napětí U_0
- vysoká spolehlivost vyhledání rezonančního maxima U_0
- automatické nastavení konečného provozního stavu podladění nebo přeladění podle zvolené procentní hodnoty z rezonančního proudu ZT
- místní a dálkové blokování funkcí nebo start ladicího pochodu
- místní a dálková signalizace stavů a poruchová signalizace

- místní manuální a dálkové ovládání chodu ZT (na žádanou hodnotu I_T)
- vysoká přesnost měření napětí U_0 ve velkém dynamickém rozsahu 0 až 120V, 0 až 120% U_N , registrovaná rozlišovací schopnost 2mV
- registrace a sumarizace poruchových stavů z ochranných zařízení ZT
- v případě nespolehlivého vyhledání rezonančního maxima zastavení ladicího pochodu, hlášení přechodné poruchy, nastavení I_L ZT na požadovanou hodnotu (parametrizace) a po uplynutí zvoleného časového zpoždění nový start ladicího pochodu
- automatická kalibrace pro napětí snímané z potenciometru ZT (poloha ZT)
- integrace přechodných podmínek (parametrizace) pro připnutí odporníku při přechodných zemních poruchách
- možnost parametrizace cyklického připínání odporníku při splnění podmínek až do vyčerpání tepelné kapacity
- místní a dálkové přepínání odporníku a blokování automatických funkcí.

Automatika připínání odporníku (AR)

- řízení připínání odporníku
- maximální využití výkonové (tepelné) kapacity odporníku:
 - modelování tepelného obrazu
 - přímé měření teploty pyrometrem



Obr. 41 – Blokové schéma automatiky ARL4 [15]

Společná funkce pro kombinovanou automatiku ARL

- místní a dálková parametrizace funkcí
- připojení k místnímu řídicímu systému po galvanicky odděleném sériovém rozhraní:
 - standardní komunikační protokoly (např. IEC 870 a odvozené ABB, Landis a Gyr, Siemens, AEG)
 - nestandardní protokoly
- komunikační sériová rozhraní:
 - optické
 - variantně RS 232, RS 485
- místní ovládání a vizualizace (membránová klávesnice, LCD displej nebo grafický inteligentní displej s integrovanou dotykovou klávesnicí)
- programové vybavení pro PC notebook pro parametrizaci a vyčítání záznamů při automatické činnosti ARL, vizualizace, statistika, archiv
- autodiagnostika, ochrana proti neoprávněným funkcím v případě poruchy prvků automatiky, poruchová signalizace

Technické parametry

Binární vstupy

galvanické oddělení
 izolační pevnost4kV
 spotřeba.....typ. 2,5mA,
 max. 4 mA
 úroveň log 1 24, 110, 220
 Vss
 úroveň log 030% log 1

Binární výstupy

galvanicky oddělený kontakt relé
 izolační pevnost 4kV
 spínací schopnost 1000W/VA
 vypínací schopnost30W/VA

Analogový vstup U_0

galvanické oddělení měřicím
 transformátorem
 izolační pevnost 2kV
 U_N 100V
 přetížitelnost1,2 U_N
 dynamický rozsah měření0 až 64V
 spotřeba max.....0,1VA

Analogový vstup UP – napětí potenciometru

galvanické oddělení měřicím transformátorem
 izolační pevnost 2kV
 rozsah 0 až 5V, 0 až 20V
 spotřeba max.....0,1VA

Analogový výstup UP – pro napájení potenciometru

galvanické oddělení měřicím transformátorem
 izolační pevnost 2kV
 výstupní napětí.....5 V/50Hz

Pomocné napájení

galvanicky oddělený zdroj
 izolační pevnost 4kV
 spotřeba..... < 10W
 U_N 24, 110, 220Vss
 Konstrukční uspořádání skříň RITTAL, 1/2 19“
 krytí IP 20
 Rozsahy teplot okolí pracovní -15 °C až +55 °C
 skladování, doprava -25 °C až +70°C

Parametry limitující vyladění zhášecí tlumivky

minimální měřené napětí U_0 50mV
 minimální změna měřeného napětí
 pro start ladicího pochodu 3%
 z měřeného napětí U_0
 maximální přeladění (podladění) 0-25 %
 z proudu I_L tlumivky ZT
 maximální rychlost změny měřeného
 napětí... 25V/s
 minimální poměr $U_{0\max}/U_{0\min}$ pro vyladění
 1,05

Zajištění dodávky

60 dní po objednávce
 záruční podmínky:
 bezplatný servis 36 měsíců
 poradenství a servis

Výrobce:

EGÚ ČB, a. s.
 Energetický ústav České Budějovice [15]

6.2.2 Regulátor Petersenových tlumivek REG-DPA

- v pouzdře pro montáž na stěnu
- v pouzdře pro montáž do rozvaděčů
- v pouzdře pro montáž na lištu DIN



Použití

Volně programovatelný regulátor REG-DPA se používá v sítích středního a vysokého napětí k regulaci Petersenových tlumivek (P-tlumivky, zhášecí tlumivky zemních spojení), jejichž nastavení lze průběžně měnit při zatížení. Kromě toho s ním lze řešit všechny další řídicí, měřicí a registrační úlohy v souvislosti s Petersenovými tlumivkami.

Metoda regulace

Regulátor standardně poskytuje různé metody regulace Petersenovy tlumivky. Podle zadání úlohy lze regulovat na relativní nebo absolutní hodnotu proudu rozladění. Během zemního spojení lze Petersenovu tlumivku zkorigovat o rozladění a nastavit do rezonance. Pro regulaci více Petersenových tlumivek v zhášecím obvodu jsou k dispozici různé postupy.

Řídicí jednotka odporníku

Součástí je volně programovatelná řídicí jednotka odporníku pro zvýšení zbytkového činného proudu jako nezávislá funkční jednotka včetně tepelného modelu.

Registrace nulového napětí

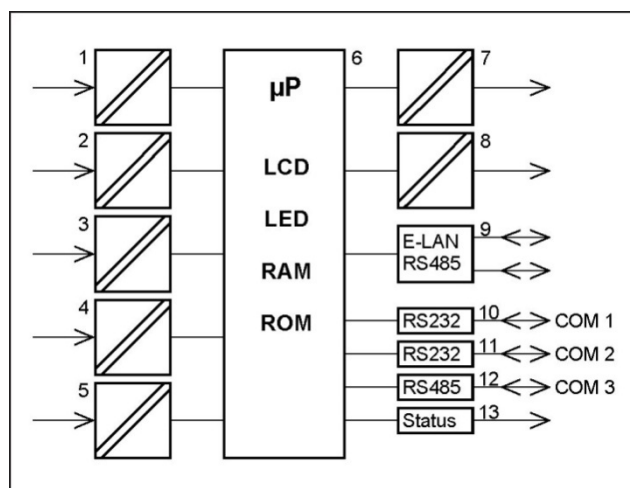
Integrovaný elektronický zapisovač průběžně ukládá časový průběh nulového napětí a polohu tlumivky. Časový průběh lze zobrazit a vyhodnotit na displeji regulátoru nebo na PC. Díky tomuto integrovanému „síťovému špionu“ lze zaznamenávat a sledovat dlouhodobé změny nulového napětí. K vyhodnocování a archivaci zaznamenaných dat s podporou osobního počítače slouží parametrizační software WinREG.

Připojení k řídicímu systému a k REGSys™

Regulátor REG-DPA je členem regulačního systému REGSys™, a proto ho lze bez problémů spojit s regulátorem napětí REG-D / PAN-D nebo s Power-Quality Interface PQI-D. REGSys™ má tu důležitou vlastnost, že všechny komponenty, které jsou navzájem spojené systémovou sběrnici E-LAN, lze parametrizovat nebo připojit k řídicímu systému přes jediné rozhraní. Tak jsou naměřené hodnoty a parametry všech připojených přístrojů k dispozici na úrovni řízení a lze je odtud číst nebo měnit. K dispozici jsou konverze podle IEC 60870-5-103 (VDEW) a IEC 60870-5101 (balanced a unbalanced mode), MODBUS, SPABUS nebo IEC61850.

Architektura systému Multimaster

Jestliže je přes systémovou sběrnici E-LAN spojeno více přístrojů, lze pomocí PC parametrizovat a číst každého účastníka na sběrnici přes rozhraní (COM 1, COM 2). Navíc může více PC provádět současně přístup na jednotlivé účastníky systému (Multimaster).



Obr. 42 – Funkce regulátoru REG-DPA [12]

- 1 Měnič napětí (nulové napětí)
- 2 Hlášení polohy Petersenovy tlumivky (odporový snímač)
- 3 Měnič proudu (např.: proud Petersenovou tlumivkou)
- 4 Binární vstupy
- 5 Napájení
- 6 Jednotka pro zobrazení a zpracování
- 7 Binární výstupy
- 8 Analogové výstupy
- 9 Přípoj E-LAN (2 x RS485 s opakovačem)
- 10 COM1, RS232
- 11 COM2, RS232 (volitelně)
- 12 COM3, RS485 (volitelně)
- 13 Stavové hlášení (relé)

Technické parametry

Předpisy a normy

IEC 1010/EN61010 (VDE 0411) CAN / CSA – C
 22.2 No. 1010.1 – 92 VDE 0110 IEC 255-4
 EN 55011: 1991
 EN 50082 – 2: 1995 IEC 688-1 IEC 529
 EN 50178 / VDE 0160 / 11.94 (v souč. době návrh)
 VDE0106, část 100 DIN 40050

Vstup střídavého napětí (U_{en} a U_{I2})

Nulové napětí U_{en} 0,1V ... 120V
 Synchronizační napětí U_{I2} 230 V $\pm 10\%$
 Tvar křivky sinus
 Frekvenční rozsah 45...50...60...65 Hz
 Vlastní spotřeba $< U_E^2 / 20 \text{ k}\Omega$
 Přetížitelnost 1,2 * 120V

Vstup střídavého proudu (I_p)

Proudový rozsah 1A / 5A
 Tvar křivky sinus
 Frekvenční rozsah 45...50...60...65Hz
 Vlastní spotřeba $< 0,5 \text{ VA}$
 Přetížitelnost 10A trvale
 100 I_{jmen} po dobu 1s

30 I_{jmen} po dobu 10 s 500A po dobu 5ms

Hlášení polohy (I_{pos})

Snímač potenciometr
 Jmenovité hodnoty R_n 0,2k Ω , 0,5k Ω ,
 1 k Ω , 3 k Ω
 Měřicí napětí cca 5 VDC
 Proud volitelný pomocí
 přepínače DIP 1mA (3k Ω)
 5mA (600 Ω)
 10mA (300 Ω)
 20mA (150 Ω)
 Chybové hlášení při přerušení nebo zkratu snímače,
 příp. když je napětí na jezdcí mimo rozsah měření.

Analogové výstupy 20 mA

Počet viz Údaje pro objednávku
 Výstupní rozsah -20mA...0...20mA,
 (Y1... Y2) Y1 a Y2 jsou volně
 programovatelné
 Oddělení potenciálů optoelektronický vazební
 člen
 Rozsah zátěže $0 \leq R \leq 8 \text{ V} / Y2$

Střídavá složka < 0,5 % z Y2
 Mezní chyba 0,5 %, vztaženo k Y2
 Výstup lze provozovat trvale nakrátko nebo naprázdno. Výstupní přípoje jsou galvanicky oddělené od všech ostatních obvodů.

Binární vstupy

Vstupy E1 ... E16
 Vstupní napětí AC/DC 48V...230V
 Tvar křivky, přípustný obdélník, sinus
 Úroveň H > 35V
 Úroveň L < 25V
 Frekvence signálu fs $DC \leq f_s \leq 60\text{Hz}$
 Vstupní odpor $\geq 47\text{k}\Omega$
 Oddělení potenciálů optoelektronický vazební člen;
 všechny vstupy navzájem oddělené

Binární výstupy (REL 1-13)

Relé R1 ... R13, vč. stavu
 Max. frekvence spínání $\leq 1\text{Hz}$
 Oddělení potenciálů oddělené od všech potenciálů uvnitř přístroje
 Zatížení kontaktů AC 250V, 5A ($\cos\phi = 1,0$)
 AC250V, 3A ($\cos\phi=0,4$)
 DC 220V, 55W (L/R=0ms)
 DC 100V, 55W (L/R=0ms)
 DC 60V, 60W (L/R=0ms)
 DC 30V, 150W (L/R=0ms)
 Počet spínacích cyklů $> 10^5$ elektricky
 Stavové relé ve spínacím nebo rozpínacím provedení (volitelné pájenou propojkou)

Referenční podmínky

Referenční teplota $23^\circ\text{C} \pm 1\text{K}$
 Vstupní veličiny 1V, 5V, 20V, 100V
 Napájecí napětí $H = H_n \pm 1\%$
 Frekvence 50 Hz...60Hz
 Tvar křivky sinus, součinitel tvaru 1,1107
 Zátěž analogového výstupu $R_n = 4\text{V} / Y2 \pm 1\%$
 Ostatní IEC 688 – část 1

Požadavky na okolí

Suché chladno IEC 60068-2-1, -15°C / 16 hod.
 Suché teplo IEC 60068-2-2, $+65^\circ\text{C}$ / 16hod.
 Vlhké teplo trvale IEC60068-2-78+ $40^\circ\text{C}/93\%/2\text{dny}$
 Vlhké teplo cyklicky IEC 60068-2-30 12+12 hod., 6 cyklů $+55^\circ\text{C} / 93\%$
 Pádová zkouška IEC 60068-2-31
 pád z výšky 100 mm, bez obalu
 Vibrace IEC 60255-21-1, třída 1
 Ráz IEC 60255-21-2, třída 1
 Odolnost proti zemětřesení IEC 60255-21-3, třída 1

Ukládání dat

Parametry přístroje sériový EEPROM s > 1000
 k zápisových/čtecích cyklů RAM – data laserem
 svařovaná lithiová baterie

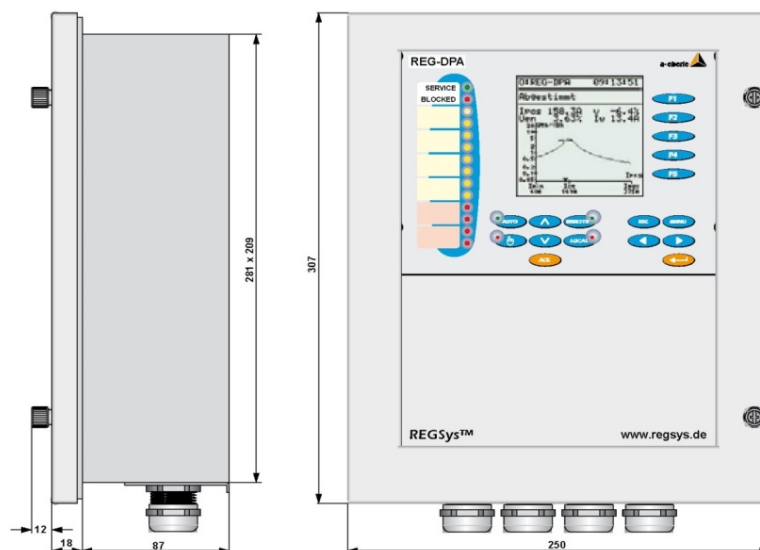
Mechanická konstrukce

Pouzdro ocelový plech, RAL 7035, šedá
 Výška 288mm
 Šířka 216mm
 Celková hloubka 114mm
 Vestavná hloubka 87mm
 Hmotnost < 3kg
 Dvířka skříňky s křemičitým sklem
 Průčelí umělá hmota, RAL 7035, šedá
 na hliníkovém nosiči
 Výřez v rozváděči
 Výška 282mm
 Šířka 210mm
 Stupeň krytí IP 54
 Rain Test 3R UL50

Optické rozhraní

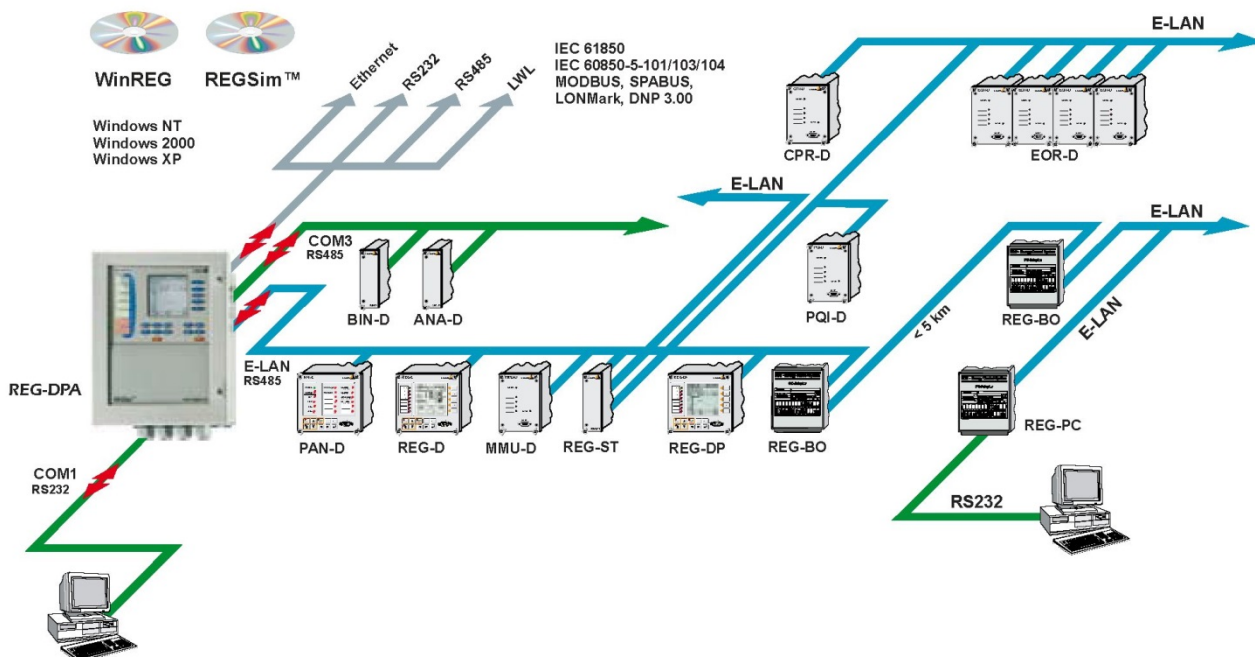
Regulátor REG-DPA lze připojit k řídicímu systému i přes LWL rozhraní (světlovodič).
 K dispozici jsou vysílače i přijímače pro skleněné a umělohmotné světlovodiče.
 Kromě toho lze vybírat z různých možností mechanického připojení (konektory ST nebo FSMA).

Mechanické rozměry

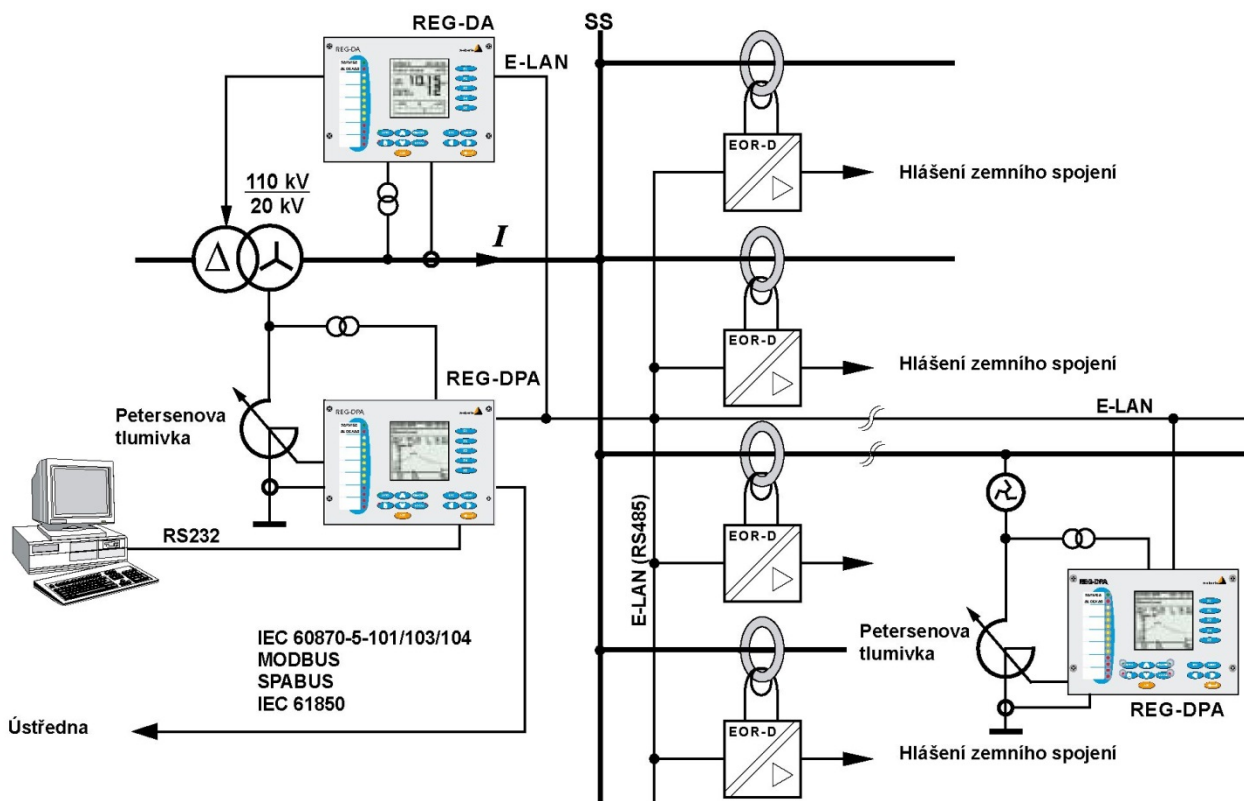


Obr. 43 – mechanické rozměry REG-DPA [12]

REGSys™ – přehled



Obr. 44 – REGSys™ – přehled [12]



Obr. 45 – Automatizační ostrůvek „Napájení“ [12]

Parametrizační a konfigurační software WinREG

K parametrizaci a programování systému slouží PC software WinREG. WinREG lze provozovat ve třech různých režimech.

V **režimu Panel** lze zobrazit až šest regulátorů současně a lze je ovládat pomocí myši.

Všechna nastavení, která jsou pomocí fóliové klávesnice možná přímo na regulátoru, lze s WinREG provádět centralizovaně. Podmínkou ovšem je, že jsou všechny regulátory navzájem zapojeny v síti prostřednictvím E-LAN.

Režim Parametry slouží k jednoduché parametrizaci jednotlivých komponent. Ve velmi přehledné organizaci kartotéčních lístků lze zadávat jednotlivé parametry, ukládat je pro pozdější použití nebo přenášet na některého sběrníkového účastníka.

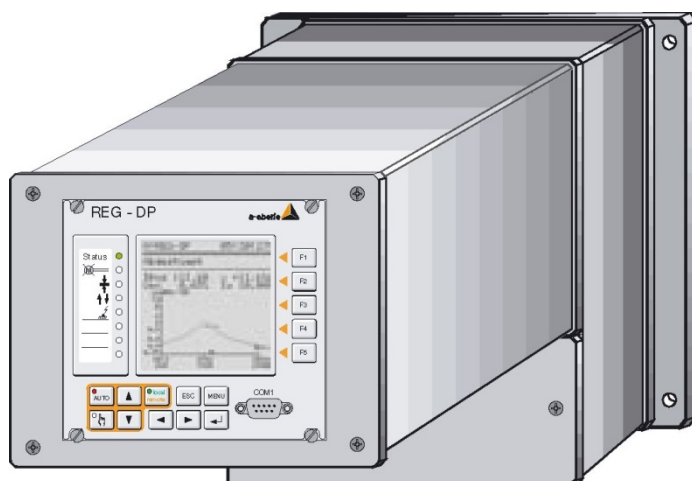
Zvláště pro současný provoz regulátorů napětí, regulátorů Petersenových tlumivek a ostatních komponent REGSys™ v jedné části zařízení tak získáme jednoduché a maximálně přehledné ovládání.

Režim Terminál otevírá možnosti přímé komunikace se systémem.

Terminál WinREG je přitom daleko komfortnější než známé terminálové programy a značně usnadňuje programování systému.

WinREG pracuje pod Windows 95, Windows 98 nebo pod Windows NT. [12]

6.2.3 Regulátor Petersenových tlumivek REG-DP



Jedná se o prakticky totožný typ jako regulátor REG-DPA, parametry a softwarovou výbavu má shodnou, liší se pouze v provedení konstrukce. [12]

6.2.4 Závěrečný resultát

Výběr vhodné automatiky ladění zhášecí tlumivky značně zjednodušuje skutečnost, že dodavatelů pro Český trh je poskrovnu. Automatiky firmy EGU ARL4 ve srovnání s regulátory firmy a-eberle, u nás zastoupené firmou GMC, zaostávají v mnoha ohledech. Proto se můj výběr zúžil na regulátory REG-DP a REG-DPA. Vzhledem k tomu, že firma GMC úzce spolupracuje s firmou EGE, která dodává většinu tlumivek pro firmu DALKIA, která spravuje důlní síť a rozvodny, jeví se mi tento výběr jako ideální. Tato kombinace je ověřena letitou praxí, a výsledný efekt je bezproblémový. Rozdíl mezi REG-DP a REG-DPA je pouze v konstrukci. Typ DPA je menších rozměrů, ale zároveň je taky levnější, typ DP je robustnější, je zde možnost montáže do 19" skříně a má větší počet doplňků, tomu odpovídá i vyšší cena. Po zhodnocení všech aspektů jsem vybral jako nejvhodnější alternativu regulátor REG-DPA, který je pro regulaci navržené tlumivky dostačující a zároveň ekonomičtější. Tento moderní typ automatiky ladění bude důstojným nástupcem doposavad používaných regulátorů AL-2 a AR-3 na většině rozvodů v sítích OKD, které již byli v poruše nebo mimo provoz.

7 Závěr:

Cílem předkládané práce bylo navržení zhášecí tlumivky a následný výběr vhodné automatiky ladění z nabízených výrobků na našem trhu.

Předtím, než jsem se mohl věnovat praktickým výpočtům, bylo nutné osvětlit základní teoretické prvky, které s tímto souvisejí. Proto v první – teoretické části – popisují nejprve obecně poruchové jevy, které následně konkretizují na případu zemního spojení a možnosti jeho kompenzace. V další teoretické podkapitole se už konkrétně zabývám problematikou zhášecích tlumivek a jejich ladění. Vzhledem k tomu, že celý návrh je řešen v sítích OKD, jsou v jednotlivých kapitolách teoretické části zmiňovány i specifikace důlních sítí.

V praktické části diplomové práce se již konkrétně věnuji popisu jednotlivých vývodů reálné sítě 22kV z rozvodny Darkov 3 - 9. květen. Nejprve jsem vypočetl z hodnot udávaných výrobcem celkovou kapacitu a kapacitní proud protékající kabelovým vedením a následně i vedením venkovním. Pro zjednodušení veškerých výpočtů, jsem používal matematický program MATLAB.

Ze získaných parametrů jsem poté navrhl zhášecí tlumivku a v katalogu firmy EGE s.r.o. našel nejbližší vyšší typ, který i s rezervou 1/3 pro případný další rozvoj sítě bude dostačující.

Co se týče výběru automatiky ladění, která je důležitá pro bezchybný a co nejefektivnější chod zhášecí tlumivky a odporníku, zde jsem vybíral ze tří možných produktů, které nabízí dnešní trh v České republice. Nakonec jsem se přiklonil k variantě regulátoru REG-DPA firmy a-eberle, kterou u nás zaštiťuje firma GMC s.r.o.. Výrobci těchto automatik úzce spolupracují s firmou EGE s.r.o. a mají dlouholeté zkušenosti s laděním tlumivek dodávaných touto firmou.

Tato práce je názornou ukázkou toho, jak probíhá celý proces návrhu zhášecí tlumivky a výběr vhodné automatiky ladění.

Použitá literatura

Knižní zdroje:

- [1] Hradílek, Z.: *Elektroenergetika I a II*. Skripta VŠB TU 1992 a 1993.
- [2] Santarius, P.: *Elektrické stanice a vedení*. Skripta VŠB TU 1990.
- [3] Pauza, J.: *Zkratý v elektrických rozvodech*. SNTL 1970.
- [4] Dohnálek, P.: *Ochrany pro průmysl a energetiku*. SNTL Praha 1991.
- [5] Hájek, J.; Kvasnica, P.: *Přechodové jevy v el. soustavách*. SNTL Praha 1988.
- [6] ČSN 33 3070. *Elektrotechnické předpisy. Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí*. Český normalizační institut, Praha, 1987.
- [7] Gurecký, J.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. Skripta VŠB TU.
- [8] Toman, P.; Drápela, J.; Mišák, S.; Orságová, J.; Paar, M.; Topolánek, D.; a kol.: *Provoz distribučních soustav*. Praha 2011.
- [9] Hodinka, H.; Fecko, Š.; Němeček, F.: *Přenos a rozvod elektrické energie*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1989.
- [10] Fejt, Z.; Čermák, J.: *Elektroenergetika*. Ediční středisko ČVUT, Praha 1983.

Elektronické zdroje:

- [11] Portál EGE, s.r.o. [online]. [cit. 2014-02-10].
URL: <http://www.ege.cz>
- [12] Portál GMC - měřicí technika, s.r.o. [online]. 2012 [cit. 2014-03-5].
URL: www.gmc.cz
- [13] Zemní spojení v trojfázových soustavách [online]. [cit. 2014-03-20].
URL: <http://www.powerwiki.cz/attach/ES/ZemniSpojeni.pdf>
- [14] Portál nkt cables, s.r.o. [online]. [cit. 2014-03-15].
URL: <http://www.nktcables.com/cz/>
- [15] Portál EGU ČB, a.s. [online]. 2012 [cit. 2014-03-5].
URL: <http://www.egu.cz/egucbm.html>

Přílohy

Příloha č. 1 schéma rozvodné sítě rozvodny Darkov 3

